



(12)

Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 004 544.9**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2015/053849**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/054589**
(86) PCT-Anmeldetag: **02.10.2015**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **07.04.2016**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **17.08.2017**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **22.02.2024**

(51) Int Cl.: **H01S 3/067 (2006.01)**
H01S 3/127 (2006.01)
H01S 3/11 (2023.01)

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:

62/059,368 **03.10.2014** **US**
14/872,890 **01.10.2015** **US**

(73) Patentinhaber:

KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US

(74) Vertreter:

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

(72) Erfinder:

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

(56) Ermittelter Stand der Technik:

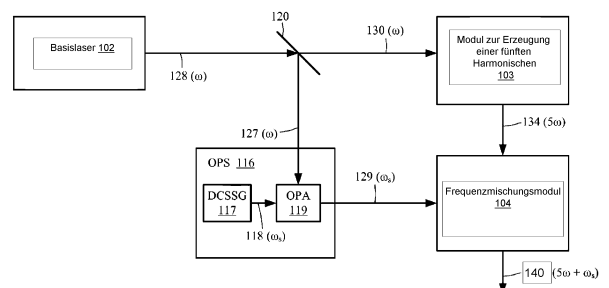
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **183-nm-LASER- UND INSPEKTIONSSYSTEM**

(57) Hauptanspruch: Eine Laseranordnung (100A) zur Erzeugung von Laserausgangslicht (140A) mit einer Ausgangswellenlänge im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm, wobei die Laseranordnung (100A) umfasst:

einen Basislaser (102), dazu ausgebildet, Basislicht (128) zu erzeugen, das eine Basisfrequenz hat;
ein Optisch-Parametrisches-System (OPS) (116), das mit dem Basislaser (102) gekoppelt ist, so dass das OPS (116) einen ersten Teil (127) des Basislichts (128) empfängt, und wobei das OPS (116) dazu ausgebildet ist, ein frequenzkonvertiertes Signal (129) mit einer herabgesetzten Frequenz, welche geringer als die Basisfrequenz ist, zu erzeugen;
einen Erzeuger einer fünften Harmonischen (103), der mit dem Basislaser (102) verbunden ist, so dass der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) einen zweiten Teil (130) des Basislichts (128) empfängt, und wobei der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) dazu ausgebildet ist, Licht der fünften Harmonischen (134) zu erzeugen, welches eine Frequenz der fünften Harmonischen hat, welche dem Fünffachen der Basisfrequenz entspricht; und
ein Frequenzmischungsmodul (104), das optisch gekoppelt ist, um das frequenzkonvertierte Signal (129) von dem OPS (116) und das Licht der fünften Harmonischen (134) von dem Erzeuger der fünften Harmonischen (103) zu empfangen, und dazu ausgebildet ist, das Laseraus-

gangslicht (140A) zu erzeugen, indem das frequenzkonvertierte Signal (129) und das Licht der fünften Harmonischen (134) gemischt werden, wobei das OPS (116) umfasst:
einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (117), dazu ausgebildet, ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (118) zu erzeugen, welches die herabgesetzte Frequenz und ein erstes Leistungsniveau hat; und
einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (optical parametric amplifier, OPA) (119), derart ausgebildet, dass das frequenzkonvertierte Leitsignal (118) und ein Teil (127) des Basislichts (128) durch einmaliges Durchlaufen eines nichtlinearen Kristalls (607) gemischt werden, wobei der nichtlineare Kristall (607) so ausgebildet ist, dass das Mischen das ...



(56) Ermittelter Stand der Technik:

| | | |
|-----------|-------------------------|-----------|
| US | 2013 / 0 313 440 | A1 |
| US | 2014 / 0 226 140 | A1 |
| US | 5 742 626 | A |

Beschreibung

PRIORITÄTSANMELDUNG

[0001] Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der provisorischen US-Patentanmeldung 62/059,368 mit dem Titel „183NM LASER AND INSPECTION SYSTEM“, eingereicht durch Chuang et al. am 03. Oktober 2014.

VERWANDTE ANMELDUNG

[0002] Die vorliegende Anmeldung steht in Beziehung mit der US-Patentanmeldung 13/797,939 mit dem Titel „Solid-State Laser and Inspection System Using 193nm Laser“, eingereicht am 12. März 2013 durch Chuang et al., und hierin durch Verweis aufgenommen.

HINTERGRUND DER OFFENBARUNG

Gebiet der Offenbarung

[0003] Die Offenbarung bezieht sich auf einen Laser und speziell auf einen Festkörperlaser oder Faserlaser, der Strahlung nahe 183 nm erzeugt und für die Verwendung bei der Inspektion von Photomasken, Retikeln und/oder Wafern geeignet ist. Der Laser ist vorzugsweise ein gepulster Laser, etwa ein Laser mit Güteschaltung oder ein modengekoppelter Laser. Diese Offenbarung betrifft ferner ein Inspektionssystem, das einen bei einer Wellenlänge nahe 183 nm arbeitenden Laser verwendet.

Verwandte Lehre

[0004] Excimer-Laser zur Erzeugung von Licht bei 193 nm sind wohlbekannt. Leider eignen sich solche Laser nicht sonderlich für Inspektionsanwendungen, aufgrund ihrer geringen Laserpulswiederholungsraten und der Verwendung toxischer und korrosiver Gase in ihrem Lasermedium, was zu hohen Betriebskosten führt.

[0005] Festkörper- und Faserlaser zur Erzeugung von Licht nahe 193 nm sind ebenfalls bekannt. Beispielhafte Laser verwenden zwei verschiedene Basiswellenlängen (z.B. US 2014 / 0 111 799 A1 von Lei et al.) oder die achte Harmonische der Basiswellenlänge (z.B. US 7 623 557 B2 für Tokuhisa et al.), was in beiden Fällen Laser oder Materialien erfordert, welche teuer sind oder nicht in hoher Stückzahl hergestellt werden. Ein anderer Ansatz (US 5 742 626 A an Mead et al.) hat nicht zu einem kommerziellen Produkt mit stabilem Ausgang und hoher Leistung geführt, wie für Halbleiterinspektionsanwendungen erforderlich (ungefähr 1 W oder mehr ist typischerweise erforderlich, bei einem Laser der durchgehend über drei oder mehr Monate zwischen Wartungsvorgängen laufen kann). Ferner haben die

meisten dieser Laser eine sehr geringe Ausgangsleistung und sind auf Laserpulswiederholungsraten von wenigen MHz oder darunter beschränkt.

[0006] US 2013 / 0 313 440 A1 betrifft eine Laseranordnung und ein Inspektionssystem. Aus Basislicht mit einer Wellenlänge von ca. 1064 nm wird Licht mit einer Wellenlänge von ca. 193 nm erzeugt. Dazu werden Frequenzvervielfachung und Frequenzaddition mittels nichtlinearer optischer Elemente eingesetzt. Unter anderem kommt ein Leitsignallaser kombiniert mit einem Optisch-Parametrischen-Verstärker zum Einsatz, als Alternative hierzu ein Optisch-Parametrischer-Oszillator.

[0007] US 2014 / 0 226 140 A1 beschreibt ein Lasersystem zur Erzeugung von kurzweiligem Laserlicht aus langweiligem Laserlicht durch Frequenzvervielfachung und Frequenzmischung. Es werden ein Optisch-Parametrischen-Verstärker oder ein Optisch-Parametrischer-Oszillator eingesetzt.

[0008] Mit abnehmenden Abmessungen von Halbleiterbauelementen nimmt auch die Größe des größten Teilchen- oder Strukturdefekts ab, der ein Versagen des Bauelements verursachen kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, kleinere Teilchen und Defekte auf strukturierten und unstrukturierten Halbleiterwafern zu detektieren. Die Intensität von Licht, das von Teilchen gestreut wird, die kleiner sind als die Wellenlänge dieses Lichts, skaliert allgemein als eine hohe Potenz der Dimensionen dieses Teilchens (zum Beispiel skaliert die gesamte Streulichtintensität von einem isolierten kleinen sphärischen Teilchen proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers der Sphäre und umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge). Aufgrund der erhöhten Streulichtintensität ergibt sich bei kürzeren Wellenlängen im Allgemeinen eine bessere Empfindlichkeit für die Detektion kleiner Teilchen und Defekte als bei längeren Wellenlängen.

[0009] Da die Intensität von von kleinen Teilchen und Defekten gestreutem Licht im Allgemeinen sehr niedrig ist, ist eine hohe Beleuchtungsintensität erforderlich, um ein Signal zu erzeugen, das in einer sehr kurzen Zeit detektiert werden kann. Durchschnittliche Leistungsniveaus der Lichtquelle von 1 W oder mehr können erforderlich sein. Bei diesen hohen durchschnittlichen Leistungsniveaus ist eine hohe Pulswiederholungsrate wünschenswert, da die Energie pro Puls umso niedriger ist, je höher die Wiederholungsrate ist, und damit das Risiko einer Beschädigung der Systemoptik oder des Artikels, der inspiziert wird, umso niedriger ist. Hohe Wiederholungsraten sind auch bei der schnellen Inspektion wünschenswert, da eine hohe Wiederholungsrate (etwa um die 50 MHz oder höher) es ermöglicht, für jedes Bild viele Pulse zu sammeln, was zu einer

geringeren Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Intensität von Puls zu Puls führt.

[0010] Daher ergibt sich der Bedarf für einen Laser, vorzugsweise einen Festkörper- oder Faserlaser, der Strahlung kürzer als 193 nm erzeugt und für die Verwendung bei der Inspektion von Photomasken, Retikeln und/oder Wafern geeignet ist. Insbesondere erfordern solche Inspektionen bei hoher Geschwindigkeit oftmals minimale Laserpulswiederholungsraten von mehreren MHz (z.B. in manchen Fällen über 50 MHz).

ÜBERSICHT DER OFFENBARUNG

[0011] Die vorliegende Offenbarung ist auf eine Laseranordnung und ein zugehöriges Verfahren zur Erzeugung von 183-nm-Laserlicht gerichtet, unter Verwendung eines Basislasers über das Erzeugen und Mischen einer fünften Harmonischen des Basislaserlichts mit einem frequenzkonvertierten Signal, wobei das frequenzkonvertierte Signal erzeugt wird, indem ein frequenzkonvertiertes Leitsignal niedriger Leistung erzeugt wird, das eine erforderliche herabgesetzte Frequenz hat, und dann das frequenzkonvertierte Leitsignal mit einem Teil des Basislaserlichts gemischt wird, um das frequenzkonvertierte Signal bei einem Leistungsspitzeniveau zu erzeugen, das das Zehnfache oder höher des frequenzkonvertierten Leitsignals beträgt. Zusätzlich zu der Effizienz, die mit der Verwendung von Licht der fünften Harmonischen zur Erzeugung des 183-nm-Laserausgangslichts einhergeht, bietet der zweistufige Ansatz zur Erzeugung des frequenzkonvertierten Signals gemäß der vorliegenden Offenbarung mehrere Vorteile über herkömmliche Herangehensweisen. Zunächst erleichtert der Anfangsschritt der Erzeugung des frequenzkonvertierten Leitsignals niedrigerer Leistung es, Verzerrung und Beschädigung der optischen Komponenten zu vermeiden, die verwendet werden, um das frequenzkonvertierte Signal höherer Leistung zu erzeugen, indem das Ausgesetztsein dieser Komponenten an Mitläuferfrequenzen hoher Leistung mit Wellenlängen über ungefähr 4 μm minimiert wird, die von den meisten nichtlinearen Kristallen in einer Weise absorbiert werden, die Verzerrung und/oder Schäden verursacht. Zweitens ermöglicht die Erzeugung des frequenzkonvertierten Leitsignals bei relativ niedriger Leistung größere Kontrolle über die herabgesetzte Frequenz, welche wiederum die Feinabstimmung des 183-nm-Laserausgangslichts erleichtert. Ein anderer Vorteil der vorliegenden Offenbarung ist, dass sie die Herstellung von 183-nm-Laseranordnungen unter Verwendung einer Vielfalt von Komponenten erleichtert, wodurch sich bei der Herstellung Flexibilität ergibt, indem es dem Hersteller ermöglicht wird, bei der Herstellung Komponenten auszuwählen und zu verwenden, die leicht verfügbar und/oder relativ billig sind. Beispielsweise erzeugen die ver-

schiedenen beschriebenen Ausführungsformen 183-nm-Laserausgangslicht, indem eine ausgewählte Basisfrequenz (z.B. mit entsprechenden Basiswellenlängen von ungefähr 1064 nm oder ungefähr 1030 nm) mit einer entsprechenden herabgesetzten Signalfrequenz (z.B. mit entsprechenden konvertierten Wellenlängen im Bereich von ungefähr 1250 nm bis ungefähr 1420 nm, oder im Bereich von ungefähr 1400 nm bis ungefähr 1830 nm) gemischt wird. Basislaser, die in der Lage sind, zumindest eine dieser Basisfrequenzen zu erzeugen, sind typischerweise leicht zu vernünftigen Preisen verfügbar, in verschiedenen Kombinationen von Leistung und Wiederholungsrate. Da ein Optisch-Parametrisches-System (OPS) das frequenzkonvertierte Signal in einer Weise erzeugt, die die Kontrolle der herabgesetzten Signalfrequenz erleichtert, ermöglicht es die vorliegende Offenbarung einem Hersteller, den billigsten oder am leichtesten verfügbaren Basislaser für einen gegebenen Herstellungsdurchlauf auszuwählen, in vollem Vertrauen darauf, dass das 183-nm-Laserausgangslicht erzeugt wird.

[0012] Gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung beinhaltet die Laseranordnung einen Basislaser, ein Optisch-Parametrisches-System (OPS), einen Erzeuger einer fünften Harmonischen und ein Frequenzmischungsmodul. Der Basislaser ist dazu ausgebildet, Basislicht mit einer Basiswellenlänge (z.B. gleich einer der folgenden: ungefähr 1064 nm, ungefähr 1053 nm, ungefähr 1047 nm oder ungefähr 1030 nm) und einer entsprechenden Basisfrequenz zu erzeugen. Das OPS ist mit dem Basislaser optisch gekoppelt, so dass das OPS einen ersten Teil des Basislichts empfängt, und ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Signal mit der erforderlichen herabgesetzten Frequenz ω_s zu erzeugen. In einer Ausführungsform ist die erforderliche herabgesetzte Frequenz (ω_s) kleiner als die Basisfrequenz (ω) und größer als 50% der Basisfrequenz (d.h. $0.5\omega < \omega_s < \omega$). Der Erzeuger einer fünften Harmonischen empfängt einen zweiten Teil des Basislichts und empfängt optional auch eine vierte Harmonische, und ist dazu ausgebildet, Licht der fünften Harmonischen (d.h. mit einer Frequenz der fünften Harmonischen (5ω) gleich dem Fünffachen der Basisfrequenz) zu erzeugen. Das Frequenzmischungsmodul ist optisch gekoppelt um das frequenzkonvertierte Signal von dem OPS und das Licht der fünften Harmonischen von dem Erzeuger einer fünften Harmonischen zu empfangen, und dazu ausgebildet, das 183-nm-Laserausgangslicht zu erzeugen, indem es das frequenzkonvertierte Signal und das Licht der fünften Harmonischen funktionell mischt. Gemäß der vorliegenden Offenbarung beinhaltet das OPS einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (z.B. einen Leitlaser oder einen Optisch-Parametrischen-Oszillator), der dazu ausgebildet ist, ein frequenzkonvertiertes Leitsignal bei einer erforderlichen herabgesetzten Frequenz

und einem relativ niedrigen (ersten) Leistungsspitzenniveau zu erzeugen, und einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (OPA), derart ausgebildet, dass das frequenzkonvertierte Leitsignal und ein Teil des Basislichts gemischt werden, indem sie einmal durch einen nichtlinearen Kristall laufen, wobei sie das frequenzkonvertierte Signal bei der herabgesetzten Frequenz und einem (zweiten) Leistungsspitzenniveau erzeugen, das zehnmal (oder mehr) höher ist als das des frequenzkonvertierten Leitsignals. Das OPS ist ebenso dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Signal bei einer geeigneten herabgesetzten Frequenz und einem geeigneten Leistungsspitzenniveau zu erzeugen, so dass eine Summe der herabgesetzten Frequenz und der Frequenz der fünften Harmonischen das Laserausgangslicht in dem Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm erzeugt.

[0013] In alternativen Ausführungsformen ist der Basislaser dazu ausgebildet, Basislicht bei einer Basisfrequenz zu erzeugen, die eine entsprechende Wellenlänge gleich einer der folgenden hat: ungefähr 1064 nm, ungefähr 1053 nm, ungefähr 1047 nm und ungefähr 1030 nm, und das OPS ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Signal bei einer herabgesetzten Signalfrequenz und entsprechenden Wellenlänge zu erzeugen, die, wenn sie mit der fünften Harmonischen der Basisfrequenz (z.B. ungefähr 1250 nm bis 1420 nm für eine Basiswellenlänge von ungefähr 1064 nm) gemischt wird, Laserausgangslicht bei ungefähr 183 nm erzeugt. Als ein weiteres Beispiel wird, wenn die Basiswellenlänge ungefähr 1030 nm beträgt, das frequenzkonvertierte Signal mit einer Wellenlänge von ungefähr 1400 nm bis 1830 nm erzeugt, und für Basislaser mit Wellenlänge von ungefähr 1047 nm oder ungefähr 1053 nm wird das frequenzkonvertierte Signal mit einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1290 nm und 1580 nm erzeugt. In alternativen Ausführungsformen verwenden die hierin beschriebenen Laseranordnungen zur Erzeugung einer Ausgangswellenlänge von ungefähr 183 nm Basislaser, welche gütegeschaltete Laser, modengekoppelte Laser oder Quasi-Dauerstrich-Laser sind. Weil beinahe nicht-kritische Phasen Anpassung im finalen Frequenzmischungsmodul verwendet wird, ist dieser finale Konversionsschritt effizient und gegenüber kleinen Ausrichtungsfehlern relativ unempfindlich, was einen stabilen Ausgang bei Leistungsniveaus im Bereich von ungefähr 1 W bis 20 W oder mehr ermöglicht.

[0014] In einer Ausführungsform beinhaltet zumindest entweder der Erzeuger einer fünften Harmonischen oder das Frequenzmischungsmodul einen getemperten, mit Wasserstoff oder Deuterium behandelten Caesium-Lithium-Borat-(CLBO)-Kristall, der dazu ausgebildet ist, beinahe nicht-kritisch phasenangepasst zu sein, um eine Wellenlänge nahe 183 nm zu erzeugen, indem eine Wellenlänge

zwischen ungefähr 206 nm und 213 nm mit einer infraroten Wellenlänge gemischt wird. Wegen der beinahe nicht-kritischen Phasen Anpassung ist die Frequenzmischung sehr effizient (z.B. kann der nichtlineare Koeffizient ungefähr 1 pm V^{-1} oder etwas größer sein), und der Abweichungswinkel klein (z.B. weniger als um die 30 mrad). In einer bevorzugten Ausführungsform wird der getemperte CLBO-Kristall bei einer konstanten Temperatur nahe 50°C gehalten.

[0015] Gemäß beispielhafter Ausführungsformen ist der Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Leitsignal bei einem niedrigeren (ersten) mittleren Leistungsniveau im Bereich von 1 mW bis 500 mW zu erzeugen, und der OPA ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Signal höherer Leistung bei einem (zweiten) Leistungsniveau im Bereich von 1 W bis 20 W (oder höher) zu erzeugen. In einer beispielhaften Ausführungsform ist der Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals des OPS unter Verwendung eines Diodenlasers implementiert, der das frequenzkonvertierte Leitsignal unmittelbar erzeugt, und in der anderen beispielhaften Ausführungsform ist der Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals unter Verwendung eines Optisch-Parametrischen-Oszillators (OPO) implementiert, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal durch Konversion eines Teils des Basislichts zu erzeugen. In beiden beispielhaften Ausführungsformen beinhaltet der OPA des Optisch-Parametrischen-Systems einen Strahlkombinierer, der dazu ausgebildet ist, den ersten Teil des Basislichts mit dem frequenzkonvertierten Leitsignal zu kombinieren, einen nichtlinearen Kristall, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal durch stimulierte Frequenzkonversion des ersten Teils des Basislichts zu verstärken, und einen Strahlteiler (Wellenlängenseparator), der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Signal von unerwünschten Frequenzen zu trennen. In einer gegenwärtig bevorzugten Ausführungsform werden die in dem OPS (z.B. im OPA und optionalen OPO) verwendeten nichtlinearen Kristalle durch periodisch gepolte nichtlineare optische Kristalle implementiert (z.B. periodisch gepolte nichtlineare optische Kristalle, die aus Lithiumniobat (LN), mit Magnesiumoxid dotiertem Lithiumniobat (Mg:LN), stöchiometrischem Lithiumtantalat (SLT), mit Magnesiumoxid dotiertem stöchiometrischem Lithiumtantalat (Mg:SLT) oder Kaliumtitanylphosphat (KTP) gebildet sind).

[0016] Gemäß einer alternativen Ausführungsform der Offenbarung wird 183-nm-Laserausgangslicht erzeugt, indem Licht der fünften Harmonischen mit einem frequenzkonvertierten Signal in einer zur oben beschriebenen ähnlichen Weise gemischt wird, aber in diesem Fall wird das frequenzkonvertierte Signal erzeugt, indem eine zweite Harmoni-

sche des Basislaserlichts frequenzkonvertiert wird (d.h. anstatt Licht der Basisfrequenz frequenzkonvertieren). Wird Basislaserlicht mit einer Wellenlänge von 1064 nm verwendet, so umfasst das Licht der zweiten Harmonischen Licht im sichtbaren grünen Spektrum (d.h. das Licht der zweiten Harmonischen hat eine Wellenlänge von 532 nm), wodurch die Erzeugung des frequenzkonvertierten Signals unter Verwendung eines „grün-gepumpten“ OPO die Aufheizprobleme vermeidet, die mit der Erzeugung von 1,3 μm frequenzkonvertierten Signalen aus 1064 nm Basislicht verbunden sind (d.h. Verzerrung/Beschädigung der nichtlinearen Kristalle im OPS, die durch Absorption von Mitläufersignalen mit Wellenlängen über 4 μm verursacht werden), womit die Erzeugung des Leitsignals niedrigerer Leistung, das in den oben beschriebenen Ausführungsformen beschrieben wurde, überflüssig wird. Jedoch birgt die Erzeugung eines 1,3 μm frequenzkonvertierten Signals durch Frequenzkonversion von 532 nm Licht andere Probleme, welche die Art der nichtlinearen Kristalle, die in dem „grün-gepumpten“ OPO verwendet werden können, einschränkt (d.h. der gegenwärtig bevorzugte nichtlineare Kristall ist LBO), und der Frequenzkonversionsprozess ist weniger effizient.

[0017] Ebenso werden hierin Systeme und Verfahren offenbart, um einen Artikel, etwa einen Halbleiterwafer, eine Photomaske oder ein Retikel zu inspizieren. Diese Systeme und Verfahren beinhalten einen Laser, der eine Ausgangswellenlänge nahe 183 nm erzeugt und beinahe nicht-kritische Phasenanpassung in dem finalen Frequenzsummationsschritt verwendet.

[0018] Zusätzlich zu ihrer kürzeren Wellenlänge haben die 183-nm-Laser der vorliegenden Offenbarung mehrere Vorteile im Vergleich mit 193-nm-Lasern. Verglichen mit Lasern die 193 nm als die sechste oder achte Harmonische erzeugen, haben die 183-nm-Laser der vorliegenden Offenbarung den Vorteil, Basiswellenlängen zu verwenden, die bei Leistungsniveaus von einigen zehn bis Hunderten von W leicht verfügbar sind. Ein Vorteil im Vergleich mit Lasern, die 193 nm durch Mischen einer fünften Harmonischen mit einer Signalfrequenz erzeugen, ist, dass das Frequenzmischungsmodul des 183-nm-Lasers effizienter ist, weil CLBO beinahe nicht-kritisch phasenangepasst ist, um 183 nm aus einer Wellenlänge einer fünften Harmonischen im Bereich von ungefähr 206 nm bis ungefähr 213 nm zu erzeugen. Dies erlaubt eine effizientere Konversion der Signalfrequenz und der fünften Harmonischen in den finalen Ausgang und macht das Frequenzmischungsmodul auch stabiler. Ein weiterer Vorteil ist, dass für eine Signalfrequenz mit einer korrespondierenden Wellenlänge zwischen ungefähr 1,25 μm und ungefähr 1,83 μm im Vergleich zum Mitläufer erheblich mehr Energie in das Signal geht, wodurch sich eine effizientere Konversion der Basis-

leistung ergibt (im Vergleich zu einer Signalwellenlänge nahe 2,1 μm , wo beinahe gleiche Beträge an Leistung in das Signal und den Mitläufer gehen müssen).

[0019] Die Erfindung ist durch die angehängten Ansprüche definiert.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die **Fig. 1A** und **1B** sind vereinfachte Blockdiagramme, die beispielhafte 183-nm-Laseranordnungen gemäß alternativen beispielhaften Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung zeigen.

Fig. 2 ist ein vereinfachtes Blockdiagramm, das einen beispielhaften Erzeuger einer fünften Harmonischen zeigt, der in den 183-nm-Laseranordnungen der **Fig. 1A** gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung verwendet wird.

Fig. 3 zeigt eine Tabelle beispielhafter Wellenlängen, die von den 183-nm-Laseranordnungen der **Fig. 1A** erzeugt und darin gemischt werden, um 183-nm-Laserausgangslicht gemäß alternativen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung zu erzeugen.

Fig. 4 ist ein vereinfachtes Blockdiagramm, das ein beispielhaftes Frequenzmischungsmodul zeigt, das in den 183-nm-Laseranordnungen der **Fig. 1A** verwendet wird, gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung.

Fig. 5 ist ein vereinfachtes Blockdiagramm, das ein Verstärkermodul zeigt, welches optional in den 183-nm-Laseranordnungen der **Fig. 1A** verwendet wird, um die Leistung des Basislaserlichts zu erhöhen, gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung.

Fig. 6A und **6B** sind vereinfachte Blockdiagramme, die beispielhafte Optisch-Parametrische-Systeme zeigen, die dazu ausgebildet sind, das frequenzkonvertierte Signal zu erzeugen, das in den 183-nm-Laseranordnungen der **Fig. 1A** gemäß alternativen speziellen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung verwendet wird.

Fig. 7 zeigt ein Inspektionssystem für ein Retikel, eine Photomaske oder einen Wafer, das zeitgleich zwei Bild- oder Signalkanäle auf einem Sensor detektiert.

Fig. 8 zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem, welches mehrere Objektive und einen der oben beschriebenen verbesserten 193-nm-Laser beinhaltet.

Fig. 9 zeigt die Hinzufügung einer Laser-Dunkelfeldbeleuchtung mit senkrechtem Einfall zu einem katadioptrischen Abbildungssystem.

Fig. 10A zeigt eine Oberflächeninspektionsvorrichtung, die ein Beleuchtungssystem und ein Sammelsystem zur Inspektion von Gebieten einer Oberfläche beinhaltet.

Fig. 10B zeigt eine beispielhafte Anordnung von Sammelsystemen für eine Oberflächeninspektionsvorrichtung.

Fig. 11 zeigt ein Oberflächeninspektionssystem, das zur Inspektion von Anomalien auf einer Oberfläche verwendet werden kann.

Fig. 12 zeigt ein Inspektionssystem, das dazu ausgebildet ist, Anomaliedetektion unter Verwendung senkrechter und geneigter Beleuchtungsstrahlen zu implementieren.

Fig. 13 zeigt einen beispielhaften Pulsvervielfacher zur Verwendung mit dem oben beschriebenen 183-nm-Laser in einem Inspektions- oder Metrologiesystem.

Fig. 14 ist ein vereinfachtes Blockdiagramm, das eine 183-nm-Laseranordnung gemäß einer weiteren alternativen Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung zeigt.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0020] Die vorliegende Offenbarung bezieht sich auf eine Verbesserung bei Inspektionssystemen, die in der Halbleiterindustrie verwendet werden, und insbesondere auf Laseranordnungen für solche Inspektionssysteme, die in der Lage sind, Laserlicht zu erzeugen, das eine durchschnittliche Ausgangswellenlänge im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm (z.B. ungefähr 183 nm) hat, und das ein durchschnittliches Leistungsniveau der Lichtquelle von 1 W oder mehr hat, in einer Weise, die die mit Herangehensweisen nach dem Stand der Technik verbundenen Probleme vermeidet. Die folgende Beschreibung wird vorgelegt, um einem Fachmann zu ermöglichen, die Offenbarung herzustellen und zu benutzen, wie es im Kontext einer spezifischen Anwendung und ihrer Erfordernisse vorgesehen ist. Man beachte, dass in der folgenden Beschreibung, wo eine Wellenlänge ohne nähere Bestimmung erwähnt wird, davon ausgegangen werden kann, dass diese Wellenlänge die Wellenlänge im Vakuum ist.

[0021] Die **Fig. 1A** und **1B** sind vereinfachte Blockdiagramme, die 183-nm-Laseranordnungen 100A bzw. 100B zeigen, gemäß alternativen beispielhaften Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung. Obwohl sich die Laseranordnungen 100A und 100B in bestimmten Aspekten unterscheiden, verwendet

jede Laseranordnung 100A und 100B im Wesentlichen den gleichen Satz optischer Kernkomponenten, d.h. jede Laseranordnung 100A und 100B beinhaltet einen Basislaser 102, ein Optisch-Parametrisches-System (OPS) 116, einen Erzeuger einer fünften Harmonischen (welcher in **Fig. 1A** mit „103“ und in **Fig. 1B** mit „157“ bezeichnet wird, aus unten erläuterten Gründen), und ein Frequenzmischungsmodul 104, welche dazu angeordnet und ausgebildet sind, Laserausgangslicht 140 zu erzeugen, das eine Frequenz im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm, und am bevorzugtesten ungefähr 183 nm, hat. Man beachte, dass diese Kernkomponenten in jeder der **Fig. 1A** und **1B** durch die gleichen oder durch ähnliche Bezugszeichen bezeichnet werden, um anzuzeigen, dass diese Kernkomponenten in jeder der beiden beispielhaften Ausführungsformen in der gleichen oder einer ähnlichen Weise ausgebildet sind und funktionieren. Insbesondere ist in jeder Ausführungsform der Basislaser 102 dazu ausgebildet, Basislicht 128 zu erzeugen, das eine Basiswellenlänge (z.B. ungefähr 1064 nm) und eine entsprechende Basisfrequenz ω hat. Ähnlich ist in jeder Ausführungsform das OPS 116 optisch mit dem Basislaser 102 gekoppelt, so dass das OPS 116 als Eingangslicht einen Teil 127 des Basislichts 128 empfängt, und ist das OPS 116 dazu ausgebildet, ein frequenzkonvertiertes Signal 129 zu erzeugen. In einer ähnlichen Weise ist der Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 optisch mit dem Basislaser 102 gekoppelt, so dass der Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 als Eingangslicht zumindest einen Teil 130 des Basislichts 128 empfängt, und ist der Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 dazu ausgebildet, Licht der fünften Harmonischen 134 bei einer Frequenz 5ω der fünften Harmonischen zu erzeugen, welche gleich dem Fünffachen der Basisfrequenz ω ist. Das Frequenzmischungsmodul 104 ist optisch gekoppelt, um als Eingangslicht sowohl das frequenzkonvertierte Signal 129 vom OPS 116 als auch das Licht der fünften Harmonischen 134 vom Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 zu empfangen, und ist dazu ausgebildet, Laserausgangslicht 140 durch Mischen des frequenzkonvertierten Signals 129 mit dem Licht der fünften Harmonischen 134 zu erzeugen.

[0022] Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Offenbarung benutzt das OPS 116 einen Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals 117 (z.B. einen Dioden-Laser oder einen OPO) und einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (OPA) 119, um das frequenzkonvertierte Signal 129 bei einer herabgesetzten Frequenz ω_s zu erzeugen, so dass es, wenn es mit dem Licht der fünften Harmonischen 134 im Frequenzmischungsmodul 104 gemischt wird, das Laserausgangslicht 140 bei der gewünschten Wellenlänge (d.h. im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm) erzeugt. Insbesondere ist der Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals

117 dazu ausgebildet, ein frequenzkonvertiertes Leitsignal 118 zu erzeugen, welches die gleiche herabgesetzte Frequenz ω_s wie das frequenzkonvertierte Signal 129 hat, aber welches ein niedrigeres (erstes) Leistungsspitzeniveau hat, welches wesentlich niedriger ist, als das des frequenzkonvertierten Signals 129. So wie hierin gebraucht, soll der Ausdruck „frequenzkonvertiert“ angeben, dass die herabgesetzte Frequenz ω_s des frequenzkonvertierten Signals 129 eine niedrigere Frequenz ist als die Basisfrequenz ω des Basislasersignals 128. In einer bestimmten Ausführungsform ist die herabgesetzte Frequenz ω_s außerdem höher als 50% (1/2) der Basisfrequenz ω (d.h. $0,5\omega < \omega_s < \omega$). Der OPA 119 ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Leitsignal 118 mit dem Teil 127 des Basislichts zu mischen, um das frequenzkonvertierte Signal 129 bei dem erforderlichen (zweiten) Leistungsspitzeniveau (d.h. größer als das Zehnfache des ersten Leistungsspitzeniveaus) zu erzeugen. Ein Vorteil, das frequenzkonvertierte Signal 129 höherer Leistung durch Mischen des frequenzkonvertierten Leitsignals 118 niedrigerer Leistung mit Basislicht zu erzeugen, ist, dass es viel einfacher ist, die Stabilität und Bandbreite von Laserlicht niedrigerer Leistung zu kontrollieren, so dass die Erzeugung des frequenzkonvertierten Leitsignals 118 bei dem niedrigeren (ersten) Leistungsspitzeniveau eine größere Kontrolle über die herabgesetzte Frequenz ω_s des frequenzkonvertierten Signals 129 ermöglicht. Ein weiterer Vorteil, das frequenzkonvertierte Signal 129 höherer Leistung unter Verwendung des frequenzkonvertierten Leitsignals 118 niedrigerer Leistung zu erzeugen, ist, dass diese Herangehensweise es ermöglicht, das frequenzkonvertierte Signal 129 zu erzeugen, indem das frequenzkonvertierte Leitsignal 118 und Teil 127 der Basisfrequenz nur einmal durch den OPA 119 geschickt werden, was (wie unten näher erläutert wird) die Verzerrung des frequenzkonvertierten Signals 129 minimiert, welche von Mitläuferfrequenzen verursacht wird, wenn frequenzkonvertierte Signale höherer Leistung verwendet werden, um 183-nm-Laserausgangslicht 140 zu erzeugen.

[0023] Die funktionale Anordnung und die Arbeitsweise einer jeden oben erwähnten Kernkomponente werden unten mit Bezugnahme auf die detaillierte Beschreibung der Laseranordnung 100A (**Fig. 1A**) detaillierter beschrieben. Soweit nicht anderweitig vermerkt, treffen die unten mit Bezug auf **Fig. 1A** angeführten zusätzlichen Details auch für die entsprechenden Kernkomponenten zu, welche in Laseranordnung 100B verwendet werden, und somit wird die Wiederholung der zusätzlichen Details bei der Beschreibung der **Fig. 1B** (unten) der Kürze halber ausgelassen.

[0024] Bezugnehmend auf **Fig. 1A** verwendet die Laseranordnung 100A zusätzlich zu den oben beschriebenen Kernkomponenten einen Strahlteiler

120, der optisch zwischen den Basislaser 102 und sowohl das OPS 116 als auch den Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 gekoppelt ist. Insbesondere erzeugt der Basislaser 102 Basislicht 128, welches auf den Strahlteiler 120 gerichtet wird, welcher dazu dient, das Basislicht 128 in zwei Teile zu teilen: einen ersten Teil 127, der in eine erste Richtung (z.B. nach unten) zum OPS 116 gerichtet wird, und einen zweiten Teil 130, der in eine zweite Richtung (z.B. horizontal) zum Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 gerichtet wird. Das OPS 116 frequenzkonvertiert den Teil 127 des Basislichts unter Verwendung des OPA 119 und transmittiert das frequenzkonvertierte Signal 129 mit der herabgesetzten Frequenz ω_s zum Frequenzmischungsmodul 104. Der Erzeuger einer fünften Harmonischen 103 konvertiert den Teil 130 des Basislichts und transmittiert das Licht der fünften Harmonischen 134 zum Frequenzmischungsmodul 104. Das Frequenzmischungsmodul 104 mischt das frequenzkonvertierte Signal 129 und das Licht der fünften Harmonischen 134, um Laserausgangslicht 140 zu erzeugen.

[0025] Es wird auf den linken Teil der **Fig. 1A** Bezug genommen: der Basislaser 102 ist unter Verwendung bekannter Lehre dazu ausgebildet, Basislicht 128 (in der Industrie einfach als die „Basis“ bezeichnet) bei Basisfrequenzen innerhalb einer Basisbandbreite (Bereich) $\Delta\omega$ zu erzeugen. In einer Ausführungsform ist der Basislaser 102 so ausgebildet, dass Basislicht 128 bei einer Basisfrequenz ω erzeugt wird, welche einer infraroten Wellenlänge von ungefähr 1064 nm entspricht. In einer beispielhaften Ausführungsform wird der Basislaser 102 implementiert durch Verwendung eines der folgenden: eines Nd:YAG-(Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat)-Laserm mediums, eines Nd-dotierten Yttrium-Orthovanadat-Laserm mediums, oder eines Ytterbium-dotierten Faserlasers. Geeignete Basislasers sind kommerziell als gepulste (gütegeschaltet, modengekoppelt oder Quasi-Dauerstrich) von Coherent Inc. erhältlich (einschließlich Modelle aus der Paladin-Familie mit Wiederholungsraten von 80 MHz und 120 MHz), Newport Corporation (einschließlich Modellen aus der Explorer-Familie) und anderen Herstellern. Laserleistungsniveaus solcher Basislaser können von Milliwatt bis zu einigen Zehn Watt und mehr reichen. In einer alternativen beispielhaften Ausführungsform wird der Basislaser 102 durch einen Laser implementiert, der ein Nd:YLF-(Neodym-dotiertes Yttrium-Lithium-Fluorid)-Laserm medium verwendet, das Basislaserlicht bei einer Basiswellenlänge nahe 1053 nm oder 1047 nm erzeugt. In noch einer anderen beispielhaften Ausführungsform kann der Basislaser 102 durch einen Ytterbium-dotierten Faserlaser implementiert werden, der Basislaserlicht bei einer Basiswellenlänge nahe 1030 nm erzeugt.

[0026] Es wird auf den Bereich rechts des Basislasers 102 in der **Fig. 1A** Bezug genommen: Der

Strahlteiler 120 teilt das Basislicht 128 in die Basislichtanteile 127 und 130, welche zum OPS 116 bzw. dem Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103 gerichtet werden. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der Strahlteiler 120 ein Etalon oder eine andere wellenlängenselektive Einrichtung, welche den ersten und den zweiten Anteil aus der Basiswellenlänge so auswählt, dass der zweite Anteil 130 einen schmalen Wellenlängenbereich innerhalb der Basiswellenlängenbandbreite umfasst als der erste Bereich 127. Die Verwendung einer wellenlängenselektiven Einrichtung für den Strahlteiler 120 ermöglicht es, die Ausgangsbandbreite des Lasers unabhängig von der Bandbreite des Basislasers 102 zu steuern. Weitere Details, wie eine wellenlängenselektive Einrichtung verwendet werden kann, um die Ausgangsbandbreite eines Lasers im tiefen UV, etwa eines Lasers der eine Wellenlänge nahe 183 nm erzeugt, zu steuern, finden sich in der US-Patentanmeldung 14/300,227, eingereicht am 09. Juni 2014 durch Deng et al.. Diese Patentanmeldung wird durch Verweis hierin aufgenommen. In einer Ausführungsform ist die 183-nm-Laseranordnung 100A dazu ausgebildet, bei Wiederholungsraten über 1 MHz zu arbeiten, was für Inspektionsanwendungen mit hoher Geschwindigkeit wichtig ist. Um diesen Betrieb bei hoher Wiederholungsrate zu erzielen, wird der Basislaser 102 unter Verwendung eines modengekoppelten oder Quasi-Dauerstrich-Basislasers implementiert, der bei einer Wiederholungsrate um die oder über 50 MHz arbeitet, was besonders vorteilhaft für die schnelle Inspektion von Halbleiterwafern, Photomasken und Retikeln ist, weil die Verwendung solcher hoher Wiederholungsraten schnelle Bildfassung ermöglicht und die Spitzenleistung jedes Pulses im Vergleich zu einem Laser derselben Leistung mit geringerer Wiederholungsrate reduziert (und so weniger Schaden an der Optik und dem inspizierten Artikel verursacht). Obwohl die vorliegende Offenbarung hierin als verschiedene Basiswellenlängen benutzend beschrieben wird, welche die Erzeugung von Laserausgangslicht 140 bei der gewünschten 183 nm Wellenlänge ermöglichen, können andere Wellenlängen innerhalb einiger weniger Nanometer von 183 nm erzeugt werden, indem andere Basiswellenlängen verwendet werden (d.h. wenn sie mit einer geeigneten Signalfrequenz gemischt werden). Soweit in den angehängten Ansprüchen nicht anderweitig angegeben, werden solche Laser und Systeme, die solche Laser verwenden, als im Umfang der Offenbarung befindlich angesehen.

[0027] OPS 116, welches in **Fig. 1A** unterhalb des Strahlteilers 120 befindlich ist, ist dazu ausgebildet, den ersten Teil 127 des Basislichts 128 zu empfangen und frequenzkonvertieren, so dass diese Frequenzkonversion ein frequenzkonvertiertes Signal 129 bei der erforderlichen herabgesetzten Frequenz ω_s erzeugt (d.h. so dass das Mischen des frequenz-

konvertierten Signals 129 und dem Licht der fünften Harmonischen 134 das Ausgangslaserlicht 140 bei ungefähr 183 nm erzeugt). In alternativen Ausführungsformen beinhaltet das OPS 116 einen Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO), einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (OPA), oder eine Kombination aus sowohl einem OPO als auch einem OPA.

[0028] Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Offenbarung beinhaltet das OPS 116 auch eine wellenlängenselektive Einrichtung 117, etwa ein Bragg-Volumengitter oder eine schmalbandige stabilisierte Leitdiode, welche mit dem OPO oder dem OPA zusammenwirkt, um die Frequenz ω_s und die Bandbreite des frequenzkonvertierten Signals 129 zu bestimmen, wobei die spezielle wellenlängenselektive Einrichtung, die in einer gegebenen spezifischen Ausführungsform verwendet wird, auf Grundlage der Frequenz/Wellenlänge des Basislichts 128 und der gewünschten Wellenlänge des Laserausgangslichts 140 ausgewählt wird. Wenn beispielsweise der Basislaser 102 Basislicht 128 bei einer Wellenlänge von ungefähr 1064 nm (etwa eine Wellenlänge zwischen ungefähr 1064 nm und ungefähr 1065 nm) erzeugt, dann wird die wellenlängenselektive Einrichtung 117 durch eine spezifische wellenlängenselektive Einrichtung implementiert, die das OPS 116 veranlasst, das frequenzkonvertierte Signal 129 bei einer Frequenz zu erzeugen, welche einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1250 nm und ungefähr 1420 nm entspricht, so dass sie, wenn sie mit Licht der fünften Harmonischen 134 gemischt wird, das vom Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103 auf Grundlage der 1064 nm Basisfrequenz erzeugt wurde, die Laseranordnung 100A veranlasst, Laserausgangslicht 140 bei einer Wellenlänge zwischen ungefähr 182 nm und ungefähr 185 nm zu erzeugen. In einem anderen Beispiel, wenn der Basislaser 102 Basislicht 128 bei einer Wellenlänge von ungefähr 1053 nm (d.h. etwa eine Wellenlänge zwischen ungefähr 1053 nm und ungefähr 1054 nm) erzeugt, dann wird die wellenlängenselektive Einrichtung 117 durch eine andere spezifische wellenlängenselektive Einrichtung implementiert, welche das OPS 116 veranlasst, das frequenzkonvertierte Signal 129 bei einer Frequenz zu erzeugen, welche einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1290 nm und ungefähr 1520 nm entspricht, um Laserausgangslicht 140 bei einer Wellenlänge zwischen ungefähr 181 nm und ungefähr 185 nm zu erzeugen. In noch einem anderen Beispiel, wenn der Basislaser 102 Basislicht 128 bei einer Wellenlänge von ungefähr 1047 nm erzeugt (d.h. etwa einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1047 nm und ungefähr 1048 nm), dann wird die wellenlängenselektive Einrichtung 117 durch noch eine andere spezifische wellenlängenselektive Einrichtung implementiert, welche das OPS 116 veranlasst, das frequenzkonvertierte Signal 129 bei einer Frequenz

zu erzeugen, welche einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1290 nm und ungefähr 1580 nm entspricht, um Laserausgangslicht 140 bei einer Wellenlänge zwischen ungefähr 180 nm und ungefähr 185 nm zu erzeugen. In einem letzten Beispiel, wenn der Basislaser 102 Basislicht 128 bei einer Wellenlänge von ungefähr 1030 nm erzeugt (d.h. etwa einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1029 nm und ungefähr 1031 nm), dann wird die wellenlängenselektive Einrichtung 117 durch noch eine andere spezifische wellenlängenselektive Einrichtung implementiert, welche das OPS 116 veranlasst, das frequenzkonvertierte Signal 129 bei einer Frequenz zu erzeugen, welche einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1400 nm und ungefähr 1830 nm entspricht, um Laserausgangslicht 140 bei einer Wellenlänge zwischen ungefähr 179 nm und ungefähr 185 nm zu erzeugen. Mit diesen gegebenen beispielhaften Werten wird der Fachmann erkennen, wie eine geeignete wellenlängenselektive Einrichtung für eine gegebene Basisfrequenz und Laserausgangswellenlänge auszuwählen ist.

[0029] Es wird wiederum auf **Fig. 1A** Bezug genommen: der zweite Teil 130 des Basislichts 128 wird vom Strahlteiler 120 auf das Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103 gerichtet, welches dazu ausgebildet ist und darauf hinwirkt, durch Konversion des Basisanteils 130 Licht der fünften Harmonischen 134 zu erzeugen, welches eine Frequenz hat, welche das Fünffache der Basisfrequenz ω ist. Wenn die Bandbreite des zweiten Basisanteils 130 schmaler ist als die Bandbreite des Basislichts 128 (d.h. weil der Strahlteiler 120 eine wellenlängenselektive Einrichtung umfasst), dann hat auch das Licht der fünften Harmonischen 134 eine schmalere Bandbreite, als wenn es direkt aus dem Basislicht 128 ohne Verwendung einer wellenlängenselektiven Einrichtung erzeugt worden wäre.

[0030] **Fig. 2** zeigt das Modul zur Erzeugung der fünften Harmonischen 103, welches ein erstes Frequenzverdopplungsmodul (Erzeugung der zweiten Harmonischen) 202, einen optionalen Strahlteiler/ein optionales Prisma 212, ein zweites Frequenzverdopplungsmodul (Erzeugung der vierten Harmonischen) 203, einen optionalen Strahlteiler/-kombinierer 213, ein Frequenzsummiermodul (Erzeugung der fünften Harmonischen) 204 und einen optionalen Strahlteiler oder Wellenlängenseparator 214 gemäß einer gegenwärtig bevorzugten Ausführungsform beinhaltet. Im allgemeinen arbeitet das Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103 zur Erzeugung des Lichts der fünften Harmonischen 134, indem es die Frequenzverdopplungsmodule 202 und 203 verwendet, um einen Teil des Eingangssignals bei der Basisfrequenz ω (d.h. den zweiten Basisanteil 130) zu konvertieren, um Laserlicht der vierten Harmonischen 203A bei dem Vierfachen der Basisfrequenz (4ω) zu erzeugen, und dann das Frequenzsummier-

modul 204 verwendet, um das Laserlicht der vierten Harmonischen 203A mit einem unverbrauchten Teil des Eingangslichts zu mischen. Gemäß einer gegenwärtig bevorzugten Ausführungsform wird zumindest entweder das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 oder das zweite Frequenzverdopplungsmodul 203 oder das Frequenzsummiermodul 204 unter Verwendung eines getemperten CLBO-Kristalls, eines mit Deuterium behandelten CLBO-Kristalls oder eines mit Wasserstoff behandelten CLBO-Kristalls implementiert.

[0031] Das Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103 erzeugt Laserlicht der vierten Harmonischen 203A, indem es Laserlicht der zweiten Harmonischen 202A durch das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 erzeugt und dann das Laserlicht der zweiten Harmonischen 202A unter Verwendung des zweiten Frequenzverdopplungsmoduls 203 verdoppelt. Mit Verweis auf die linke Seite der **Fig. 2** empfängt und konvertiert das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 den Basisanteil 130 bei der Basisfrequenz ω , um das Licht der zweiten Harmonischen 202A beim Doppelten der Basisfrequenz (2ω) zu bilden. Das zweite Frequenzverdopplungsmodul 203 empfängt und konvertiert das Licht der zweiten Harmonischen 202A, um das Licht der vierten Harmonischen 203A beim Vierfachen der Basisfrequenz (4ω) zu bilden. Ein unverbrauchter Anteil 202B des Basislichts 130, der das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 verlässt, kann von dem Licht der zweiten Harmonischen 202A durch einen Strahlteiler oder ein Prisma 212 abgetrennt und zum Frequenzsummiermodul 204 gerichtet werden. In einer Ausführungsform (nicht gezeigt) wird der unverbrauchte Basisanteil 202B nicht von der zweiten Harmonischen 202A abgetrennt und läuft zusammen mit dem Licht der zweiten Harmonischen 202A durch das zweite Frequenzverdopplungsmodul 203, um beim Frequenzsummiermodul 204 im Wesentlichen koinzident mit der vierten harmonischen 203A einzutreffen. Ein Vorteil des Abtrennens des unverbrauchten Basisanteils 202B vom Licht der zweiten Harmonischen 202A ist, dass eine geeignete Zeitverzögerung entweder auf den unverbrauchten Basisanteil 202B oder das Licht der vierten Harmonischen 203A angewendet werden kann, so dass die beiden Laserpulse im Wesentlichen zur selben Zeit beim Frequenzsummiermodul 204 eintreffen. Ein weiterer Vorteil ist, dass optische Elemente, etwa Spiegel, Linse und Prismen (nicht gezeigt), die zum Lenken und/oder Fokussieren des Lichts verwendet werden, in jedem Pfad separat für die passende Wellenlänge optimiert werden können.

[0032] In einer Ausführungsform wird der unverbrauchte Anteil der zweiten Harmonischen 203B (d.h. ein Teil des Lichts der zweiten Harmonischen, der im zweiten Frequenzverdopplungsmodul 203 nicht verwendet wird) von der vierten Harmonischen

203A durch den optionalen Strahlteiler/-kombinierer 213 abgetrennt. Der Strahlteiler/-kombinierer 213 kann einen oder mehrere Strahlteiler und/oder ein oder mehrere Prismen umfassen. Der Strahlteiler/-kombinierer 213 kann, falls dies erforderlich ist, die unverbrauchte Basis 202B mit der vierten Harmonischen 203A kombinieren, so dass sie zusammen zum Frequenzsummiermodul 204 laufen.

[0033] Mit Verweis auf die rechte Seite der **Fig. 2** erzeugt das Frequenzsummiermodul 204 das Licht der fünften Harmonischen 134 durch Summierung des Lichts der vierten Harmonischen 203A mit dem unverbrauchten Basislichtanteil 202B. Der optionale Strahlteiler oder Wellenlängenseparator 214 wird in machen Ausführungsformen verwendet, um jegliche unverbrauchte Basis und vierte Harmonische 204B vom Licht der fünften Harmonischen 134 abzutrennen. Der Strahlteiler 214 kann ein Prisma, einen polarisierenden Strahlteiler, einen dichroitischen Strahlteiler oder eine Kombination optischer Elemente enthalten.

[0034] In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 202 einen Lithiumtriborat-(LBO)-Kristall zur Frequenzkonversion. In anderen Ausführungsformen umfasst das Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 202 einen CLBO-, BBO- oder anderen nichtlinearen Kristall zur Frequenzkonversion. In einer bevorzugten Ausführungsform des Erzeugers einer fünften Harmonischen 103 umfasst das Modul zur Erzeugung einer vierten Harmonischen 203 einen CLBO-Kristall zur Frequenzkonversion. In anderen Ausführungsformen kann das Modul zur Erzeugung einer vierten Harmonischen 203 einen BBO- oder anderen nichtlinearen Kristall zur Frequenzkonversion umfassen. In einer bevorzugten Ausführungsform des Erzeugers einer fünften Harmonischen 103 umfasst das Frequenzsummiermodul 203 einen CLBO-Kristall zur Frequenzsummierung. In anderen Ausführungsformen kann das Frequenzsummiermodul 204 einen BBO- oder anderen nichtlinearen Kristall zur Frequenzsummierung umfassen.

[0035] **Fig. 3** zeigt eine Tabelle beispielhafter Wellenlängenbereiche (in nm) für den in **Fig. 1** gezeigten 183-nm-Laser. Für jede Art Basislaser werden eine beispielhafte kurzwellige Basis und eine beispielhafte langwellige Basis gezeigt, zusammen mit den Wellenlängen, die den Harmonischen und dem frequenzkonvertierten Signal entsprechen, die für die gewünschte Ausgangswellenlänge (183 nm im in der Tabelle gezeigten Beispiel) erforderlich sind. Die exakte Wellenlänge eines Basislasers hängt von vielen Faktoren ab, einschließlich der exakten Zusammensetzung des Lasermediums, der Betriebstemperatur des Lasermediums und dem Design der optischen Kavität. Zwei Laser, die dieselbe Laserlinie

eines gegebenen Lasermediums verwenden, können bei Wellenlängen arbeiten, die sich aufgrund der genannten und anderer Faktoren um einige Zehntel eines Nanometers oder um einige wenige Nanometer unterscheiden. Ein Fachmann erkennt, wie die geeignete Wellenlänge für das frequenzkonvertierte Signal zu wählen ist, um die gewünschte Ausgangswellenlänge ausgehend von jeder Basiswellenlänge zu erzeugen, welche denen in der Tabelle aufgeführten nahe ist. In ähnlicher Weise kann, wenn die gewünschte Ausgangswellenlänge um wenige Nanometer von 183 nm abweicht, die gewünschte Ausgangswellenlänge ebenso durch eine geeignete Anpassung der Wellenlänge für das frequenzkonvertierte Signal erzielt werden.

[0036] **Fig. 4** zeigt Frequenzmischungsmodul 104 gemäß einer bevorzugten Ausführungsform zur Verwendung in Laseranordnung 100A (**Fig. 1A**). Das Frequenzmischungsmodul 104 beinhaltet einen nichtlinearen Kristall 402, welcher in der bevorzugten Ausführungsform einen getemperten (mit Deuterium oder mit Wasserstoff behandelten) Cäsium-Lithium-Borat-(CLBO)-Kristall umfasst, der eine Eingangsoberfläche 442 und eine entgegengesetzte Ausgangsoberfläche 452 beinhaltet. Der nichtlineare Kristall 402 ist so angeordnet, dass er an der Eingangsoberfläche 442 sowohl das Licht der fünften Harmonischen 134 (d.h. vom Erzeuger einer fünften Harmonischen 103) und das frequenzkonvertierte Signal 129 (vom OPS-Erzeuger 116) empfängt, derart, dass sowohl das Signal 129 als auch das Licht 134 in den nichtlinearen Kristall 402 ungefähr kollinear (z.B. in Richtung 410, in **Fig. 4** durch den gestrichelten Pfeil angezeigt) eintreten, und zu entsprechenden Strahltaillen fokussiert werden, die innerhalb des oder nahe bei dem Kristall 402 (Strahltaillen nicht gezeigt) befindlich sind. Für eine Typ-1-Anpassung in CLBO bei einer Temperatur von ungefähr 50°C mit einem frequenzkonvertierten Signal mit einer Wellenlänge nahe 1433 nm und einer fünften Harmonischen mit einer Wellenlänge nahe 206 nm beträgt der Phasenanpassungswinkel ungefähr 74,9°. Für eine Typ-1-Anpassung in CLBO bei einer Temperatur von ungefähr 50°C mit einem frequenzkonvertierten Signal mit einer Wellenlänge nahe 1274 nm und einer fünften Harmonischen mit einer Wellenlänge nahe 213 nm beträgt der Phasenanpassungswinkel ungefähr 85,7°. Beide Beispiele zeigen, dass annähernd nichtkritische Phasenanpassung mit hoher Effizienz und niedriger Abweichung für die Erzeugung von Wellenlängen nahe 183 nm erzielt werden kann. Diese Wellenlängenkombinationen sind lediglich Beispiele und sind nicht dazu gedacht, den Umfang der Offenbarung einzuschränken. Der Fachmann erkennt, wie andere Kombinationen von Wellenlängen, Temperaturen und Winkel zu wählen sind, um Phasenanpassung zu erzielen.

[0037] In manchen Ausführungsformen ist die Eingangsoberfläche 442 des Kristalls 402 so geschnitten und positioniert, dass sie ungefähr unter dem Brewster-Winkel zum Licht der fünften Harmonischen 134 (d.h. relativ zur Richtung 410 und der Polarisation des Lichts der fünften Harmonischen 134) angeordnet ist. Dieser Winkel minimiert die Reflektion der Wellenlänge der fünften Harmonischen, und ermöglicht es so, die Erfordernis für eine Antirefleksionsbeschichtung auf der Eingangsoberfläche 442 in manchen Ausführungsformen zu vermeiden. In anderen Ausführungsformen wird eine Antirefleksionsbeschichtung (nicht gezeigt) auf die Oberfläche 442 aufgebracht, um das reflektierte Licht bei der Wellenlänge der fünften Harmonischen und/oder des Signals zu reduzieren. Die Ausgangsoberfläche 452 des Kristalls 402 kann beschichtet oder unbeschichtet sein. In einer Ausführungsform ist die Ausgangsoberfläche 452 des Kristalls 402 unter dem Brewster-Winkel geschnitten und relativ zum Laserausgangslicht 140 gehalten und ist nicht beschichtet. Man beachte, dass, falls Typ-1-Phasenanpassung verwendet wird, die Polarisation des Laserausgangslichts 140 vorzugsweise senkrecht zu der Polarisation der Eingangswellenlängen (d.h. des Lichts der fünften Harmonischen 134 und des frequenzkonvertierten Signals 129) ist, und daher muss die Brewster-Winkel-Ausgangsoberfläche 452 passend geschnitten sein. Der Vorteil, die Ausgangsoberfläche 452 nicht zu beschichten, ist, dass Beschichtungen eine kurze Lebensdauer haben können, wenn sie intensiver UV-Strahlung ausgesetzt werden.

[0038] Wiederum auf **Fig. 4** Bezug nehmend kann das Frequenzmischungsmodul 104 in bevorzugten Ausführungsformen ein oder mehrere optische Elemente (Optik) 405 verwenden, um die gewünschte Ausgangswellenlänge, d.h. das Laserausgangslicht 140 bei ungefähr 183 nm, von den anderen, unerwünschten Wellenlängen 451 (z.B. unverbrauchte Anteile des Lichts der fünften Harmonischen 134 und/oder unverbrauchte Anteile des frequenzkonvertierten Signals 129) zu trennen. Die Optik 405 kann einen Strahlteiler, ein Prisma, ein Gitter oder andere optische Elemente beinhalten. In manchen Ausführungsformen kann die Kombination aus Abweichung und dem Winkel der Ausgangsoberfläche 452 des Kristalls 402 eine hinreichende Trennung des Laserausgangs 140 von den anderen Wellenlängen erzielen, so dass die Optik 405 nicht erforderlich ist.

[0039] In bevorzugten Ausführungsformen des 183-nm-Lasers wird ein wesentlicher Anteil des Lichts der fünften Harmonischen 134, oder fast das gesamte, in dem Kristall 402 aufgrund der Verwendung eines frequenzkonvertierten Signals 129 hoher Leistung verbraucht. Zwar kann dies zu einer niedrigeren Gesamteffizienz der Konversion vom Basislicht 128 (in **Fig. 1**) zum Laserausgangslicht 140 führen, aber

ein Laser, der mehr Leistung bei der Signalwellenlänge und weniger Leistung bei der fünften Harmonischen bei einer gegebenen Ausgangsleistung verwendet, kann eine längere Lebensdauer haben und kann weniger häufig Wartung erfordern, da tiefes UV-Licht, etwa wie die vierte und die fünfte Harmonische, leicht zu Schäden und Photokontamination der Optik innerhalb des Lasers führen kann.

[0040] Man beachte, dass in jeder Ausführungsform Spiegel, Prismen, Periskope etc. verwendet werden können, um die Basiswellenlänge oder andere Wellenlängen nach Bedarf zu leiten. Prismen, Strahlteiler, Strahlkombinierer und dichroitisch beschichtete Spiegel können beispielsweise benutzt werden, um Strahlen nach Erfordernis zu trennen und zu kombinieren. Verschiedene Kombinationen von Spiegeln und Strahlteilern können verwendet werden, um die verschiedenen Wellenlängen zu trennen und zwischen den verschiedenen Frequenzkonversionsstationen in jeder geeigneten Abfolge zu leiten. Die Flächen von Frequenzkonversionskristallen, Prismen, Strahlteilern oder Linsen können in jedem Winkel geschnitten sein, der annähernd gleich dem Brewsterwinkel für eine einfallende Wellenlänge ist, um Reflektion zu minimieren oder zu steuern, ohne eine Antirefleksionsbeschichtung zu verwenden. Dieses Schneiden kann besonders vorteilhaft für jene Oberflächen sein, auf welche UV-Strahlung einfällt, da sich Antirefleksionsbeschichtungen abbauen können, wenn sie UV ausgesetzt werden, und so die Zuverlässigkeit des Lasers mindern können, wenn sie auf solchen Oberflächen benutzt werden. Verzögerungsplatten (einschließlich Brewster-Winkel-Verzögerungsplatten oder Verzögerer) oder andere optische Elemente können verwendet werden, um die Polarisation jeder der Wellenlängen nach Bedarf zu drehen, um die Polarisation entsprechend der geeigneten Kristallachse der nächsten Frequenzkonversions- oder Frequenzmischungsstufe auszurichten. Die Verwendung von Brewster-Winkel-Optiken in DUV-Lasern wird detaillierter im US-Patent 8,711,470 mit dem Titel „High Damage Threshold Frequency Conversion System“, an Armstrong beschrieben. Dieses Patent wird hierin durch Verweis aufgenommen.

[0041] Die obige Beschreibung und die zugehörigen Figuren zeigen verschiedene Laser zur Erzeugung von Licht mit einer Wellenlänge von ungefähr 183 nm. Einige spezielle Wellenlängen und Wellenlängenbereiche werden beschrieben, um Ausführungsformen zu erläutern. Andere Laserausführungsformen, die den oben beschriebenen ähnlich sind, und die eine andere Wellenlänge, wenige nm kürzer oder länger als 183 nm, erzeugen, sind möglich und liegen innerhalb des Umfangs dieser Offenbarung.

[0042] Die oben beschriebenen Figuren sind nicht dazu gedacht, den tatsächlichen physischen Aufbau

der Komponenten darzustellen. Die oben beschriebenen Figuren zeigen die hauptsächlich am Prozess beteiligten optischen Module, aber zeigen nicht jedes optische Element. Der Fachmann versteht anhand der oben beschriebenen Figuren und ihrer zugehörigen Beschreibungen, wie der 183-nm-Laser zu bauen ist. Es sollte klar sein, dass mehr oder weniger optische Komponenten verwendet werden können, um das Licht zu lenken, wo dies erforderlich ist. Linsen und/oder gekrümmte Spiegel können verwendet werden, um die Strahltaile auf Brennflecken von im Wesentlichen kreisförmigem oder elliptischem Querschnitt innerhalb oder nahe bei den nichtlinearen Kristallen zu bündeln, wo dies geeignet ist. Prismen, Strahlteiler, Gitter oder beugende optische Elemente können verwendet werden, um die unterschiedlichen Wellenlängen, falls erforderlich, an den Ausgängen jedes Frequenzkonversionsmoduls oder Frequenzmischungsmoduls zu lenken oder zu trennen. Prismen, beschichtete Spiegel oder andere Elemente können geeignet verwendet werden, um die verschiedenen Wellenlängen an den Eingängen der Frequenzkonverter und -mischer zu kombinieren. Strahlteiler oder beschichtete Spiegel können nach Eignung verwendet werden, um eine Wellenlänge in zwei Strahlen aufzuteilen. Filter können verwendet werden, um unerwünschte Wellenlängen am Ausgang jeder Stufe zu blockieren oder abzutrennen. Verzögerungsplatten können verwendet werden, um die Polarisation nach Bedarf zu rotieren. Andere optische Elemente können nach Eignung verwendet werden. In einigen Fällen kann es hinnehmbar sein, zuzulassen, dass unverbrauchtes Licht von einer Frequenzkonversionsstufe zur nächsten Stufe gelangt, auch wenn dieses Licht in der nachfolgenden Stufe nicht benötigt wird. Dies kann hinnehmbar sein, wenn die Leistungsdichte hinreichend niedrig ist, so dass sie keinen Schaden verursacht, und wenn es eine geringe Beeinflussung des gewünschten Frequenzkonversionsprozesses gibt (beispielsweise weil es keine Phasenanpassung beim Kristallwinkel gibt oder aufgrund der Polarisation des Lichts). Der Fachmann erkennt die verschiedenen Abstriche und Alternativen, die bei der Implementierung des 183-nm-Lasers möglich sind.

[0043] In einer bevorzugten Ausführungsform kann das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 (**Fig. 2**), das die zweite Harmonische erzeugt, einen Lithiumtriborat-(LBO)-Kristall beinhalten, der im Wesentlichen nicht-kritisch phasengepasst (für die passende Wahl der Kristallebene) bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und ungefähr 200°C sein kann, um eine zweite Harmonische in einem Wellenlängenbereich zwischen ungefähr 515 nm und ungefähr 532 nm zu erzeugen. In anderen Ausführungsformen kann das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 einen Cäsium-Lithium-Borat-(CLBO)-Kristall beinhalten oder einen Beta-Barium-

Borat-(BBO)-Kristall, von denen jeder kritisch phasengepasst sein kann, um eine zweite Harmonische in einem Wellenlängenbereich zwischen ungefähr 515 nm und ungefähr 532 nm zu erzeugen.

[0044] Das zweite Frequenzverdopplungsmodul 203 (**Fig. 2**), das die vierte Harmonische erzeugt, und das Frequenzsummiermodul 204, das die fünfte Harmonische erzeugt, können kritische Phasenanpassung in CLBO, BBO oder einem anderen nichtlinearen Kristall verwenden. In bevorzugten Ausführungsformen umfassen sowohl das Frequenzverdopplungsmodul 203 als auch das Frequenzsummiermodul 204 CLBO-Kristalle.

[0045] Jede der Frequenzkonversionsstufen (einschließlich der in den **Fig. 1A, 2 und 4** gezeigten) kann vorteilhaft einige, oder alle, der Verfahren und Systeme verwenden, die im US-Patent 8,873,596 mit dem Titel „Laser With High Quality, Stable Output Beam, And Long Life High Conversion Efficiency Non-Linear Crystal“ von Dribinski et al. offenbart sind. Dieses Patent wird durch Verweis hierin aufgenommen.

[0046] Jede der Frequenzkonversionsstufen (einschließlich der in den **Fig. 1A, 2 und 4** gezeigten) kann eine oder mehrere Schutzumgebungen beinhalten, etwa die in dem US-Patent 8,298,335 mit dem Titel „Enclosure for controlling the environment of optical crystals“ von Armstrong beschriebenen. Dieses Patent wird durch Verweis hierin aufgenommen. Man beachte, dass eine einzige Schutzumgebung mehrere Stufen oder eine einzige Stufe einschließen kann.

[0047] Jede der Frequenzkonversionsstufen (einschließlich der in **Fig. 1A, 2 und 4** gezeigten) kann jedes der Verfahren oder Systeme einschließen, die im US-Patent 8,298,335, mit dem Titel „Alleviation of laser-induced damage in optical materials by suppression of transient color centers formation and control of phonon population“ an Dribinski et al. beschrieben sind, jede Vorrichtung oder jedes Verfahren, die im US-Patent 8,824,514 mit dem Titel „Measuring crystal site lifetime in a non-linear optical crystal“ von Armstrong beschrieben sind, jede Vorrichtung oder jedes Verfahren, die im US-Patent 8,976,343 mit dem Titel „Laser crystal degradation compensation“ von Genis beschrieben sind, jedes System oder Verfahren, die in der provisorischen US-Patentanmeldung 61/837,053 mit dem Titel „Preferential shift direction to prolong the life and minimize perturbations of a scanning nonlinear optical crystal“ eingereicht durch Genis am 19. Juni 2013 beschrieben sind, und jedes System und Verfahren, die in den provisorischen US-Patentanmeldungen 61/666,675 und 61/762,269, beide mit dem Titel „Scan rate for continuous motion of a crystal in a frequency converted laser“ eingereicht durch Armstrong et al am 29.

Juni 2012 bzw. am 07. Februar 2013 beschrieben sind. Der Laser kann ferner jedes System oder Verfahren einschließen, die im US-Patent 8,686,331 mit dem Titel „Dynamic wavefront control of a frequency converted laser system“ an Armstrong beschrieben sind. All diese Patente, Anmeldungen und provisorische Anmeldungen werden durch Verweis hierin aufgenommen.

[0048] Man beachte des Weiteren, dass jede der Frequenzkonversionsstufen (einschließlich der in Fig. 1A, 2 und 4 gezeigten) vorteilhaft nichtlineare Kristalle verwenden kann, die mit Deuterium, Wasserstoff und/oder Fluor dotiert oder behandelt sind. Solche Kristalle können hergestellt, bearbeitet oder behandelt werden durch jeden der Prozesse oder jedes der Verfahren, die im US-Patent 9,023,152, eingereicht am 03. September 2010 durch Dribinski et al. beschrieben sind, oder die in den anhängigen US-Patentanmeldungen 13/488,635, eingereicht am 01. Juni 2012 durch Chuang et al., und 14/248,045, eingereicht am 08. April 2014 durch Dribinski et al beschrieben sind. Diese Patente und Anmeldungen werden durch Verweis hierin aufgenommen. Die dotierten oder behandelten Kristalle können besonders nützlich in den Stufen sein, die tief-ultraviolette Wellenlängen involvieren, einschließlich des Frequenzverdopplungsmoduls 203, des Frequenzsummiermoduls 204 und des Frequenzmischungsmoduls 104.

[0049] In manchen Ausführungsformen können, um bei der Basiswellenlänge hinreichend Leistung zu erzeugen, ein oder mehrere Verstärker verwendet werden, um die Leistung der Basis zu erhöhen. Werden zwei oder mehr Verstärker verwendet, so sollte vorzugsweise ein einziger Leitlaser verwendet werden, um alle Verstärker zu speisen, so dass sie alle synchronisierte Laserpulse bei der gleichen Wellenlänge ausgeben. Fig. 5 zeigt ein beispielhaftes Verstärkermodul 500, in dem ein Leitlaser 503 stabilisiertes schmalbandiges Leitlaserlicht 504 bei der gewünschten Basiswellenlänge (z.B. ungefähr 1064 nm, ungefähr 1053 nm, ungefähr 1047 nm oder ungefähr 1030 nm) erzeugen kann. In manchen Ausführungsformen ist der Leitlaser 503 einer der folgenden: ein Nd-dotierter YAG-Laser, ein Nd-dotierter Yttriumorthovanadatlaser, ein Nd-dotierter YLF-Laser, ein Faserlaser oder ein stabilisierter Diodenlaser. Das Basislicht 504 läuft zu einem ersten Verstärker 507, der das Licht zu einem höheren Leistungsniveau verstärkt, um die Basis 128 zu erzeugen. In einer Ausführungsform umfasst der erste Verstärker 507 Nd-dotierten YAG oder Nd-dotiertes Yttriumorthovanadat. In einer Ausführungsform beinhaltet eine Verstärkerpumpe 505 einen Laser, der den ersten Verstärker 507 pumpen kann. In manchen Ausführungsformen kann dieses Pumpen unter Verwendung eines oder mehrerer Diodenlaser erfolgen, die bei ungefähr 808 nm Wellenlänge oder bei ungefähr

888 nm Wellenlänge arbeiten. In anderen Ausführungsformen kann der erste Verstärker 507 einen Yb-dotierten Faserverstärker umfassen.

[0050] Fig. 5 zeigt auch beispielhafte zusätzliche Komponenten, die in manchen Ausführungsformen des Verstärkermoduls 500 verwendet werden können. Da der OPO/OPA 116, das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 und das Frequenzsummiermodul 204 (Fig. 1 und 2) die Basislaserwellenlänge als einen Eingang erhalten, und abhängig von der nahe 183 nm Wellenlänge erforderlichen Ausgangsleistung, kann mehr Basislaserlicht erforderlich sein, welches bequem in einem einzigen Verstärker mit der erforderlichen Bandbreite, Stabilität und Strahlqualität erzeugt werden kann. In der Tat kann die Erhöhung der Ausgangsleistung eines optischen Verstärkers zu erhöhter Bandbreite, Verringerung der Strahlqualität aufgrund thermischer Verzerrung oder anderer Effekte, reduzierter Stabilität und/oder verkürzter Lebensdauer führen.

[0051] Daher können in einigen Ausführungsformen des Verstärkermoduls 500 der erste Verstärker 507 und ein zusätzlicher zweiter Verstärker 517 verwendet werden, um zwei Basislaserausgänge 128 und 528 zu erzeugen, wobei Basislicht 128 wie oben erwähnt verwendet wird, und Licht 528 zu verschiedenen Frequenzkonversionsstufen (nicht gezeigt) gerichtet werden kann, an der Stelle von, z.B. 127 (in Fig. 1A) oder 202B (in Fig. 2). Der zweite Verstärker 517 kann im Wesentlichen zum ersten Verstärker 507 identisch sein. In einer Ausführungsform beinhaltet eine Verstärkerpumpe 515 einen Laser, der den zweiten Verstärker 517 pumpen kann. Die Verstärkerpumpe 515 kann im Wesentlichen identisch zu der Verstärkerpumpe 505 sein. Insbesondere kann der gleiche Leitlaser 503 verwendet werden, um beide Laser zu speisen, um sicherzustellen, dass die Ausgänge 128 und 528 bei der gleichen Wellenlänge liegen und synchronisiert sind. Ein Strahlteiler oder Prisma 511 und ein Spiegel oder Prisma 512 können das Leitlicht 504 teilen und einen Teil davon zum zweiten Verstärker 517 richten.

[0052] Fig. 6A und 6B zeigen jeweils ein OPS 116D und ein OPS 116E gemäß zweier alternativer beispielhafter Ausführungsformen. Wie oben mit Verweis auf Fig. 1A erwähnt, beinhaltet OPS 116 einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (DCSSG, down-converted signal seed generator) 117, der ein frequenzkonvertiertes Leitsignal 118 niedrigerer Leistung erzeugt, welches dann mit Basislichtanteil 127 unter Verwendung eines Optisch-Parametrischen-Verstärkers (OPA) 119 kombiniert wird, um ein frequenzkonvertiertes Signal 129 höherer Leistung zu erzeugen, welches dann zum Frequenzmischungsmodul 104 transmittiert wird, zur Mischung mit dem Licht der fünften Harmonischen 134. Wie in den folgenden beispielhaften

Ausführungsformen dargelegt, verwenden OPS 116D und OPS 116E ähnliche OPA-Strukturen, aber verwenden zwei verschiedene DCSSG-Anordnungen. Insbesondere verwendet OPS 116E (Fig. 6B) dort, wo OPS 116D (Fig. 6A) einen Leitlaser verwendet, um das frequenzkonvertierte Leitsignal direkt zu erzeugen, einen Optisch-Parametrischen-Oszillator, um das frequenzkonvertierte Leitsignal zu erzeugen, indem es einen Teil des Basislaserlichts konvertiert. Vorteile einer jeden dieser Herangehensweisen werden in den folgenden Beschreibungen dargelegt.

[0053] Mit Verweis auf Fig. 6A beinhaltet OPS 1160 allgemein einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (DCSSG) 117D, der unter Verwendung eines Leitlasers 603 implementiert ist, und OPA 119D, der einen Strahlkombinierer 611, einen nichtlinearen Kristall 607 und einen Strahlteiler 621 beinhaltet. Der Leitlaser 603 ist dazu ausgebildet, direkt frequenzkonvertiertes Leitlicht 1180 bei der gewünschten herabgesetzten Signalfrequenz ω_s zu erzeugen, und frequenzkonvertiertes Leitlicht 1180 auf den Strahlkombinierer 611 im OPA 1190 zu richten. Der Strahlkombinierer 611 ist dazu ausgebildet und angeordnet, Basislichtanteil 127 (Eingangslaserlicht) bei der Basiswellenlänge ω mit frequenzkonvertiertem Leitlicht 1180 zu empfangen, und sowohl Basislichtanteil 127 und frequenzkonvertiertes Leitlicht 1180 zu kombinieren (d.h. entlang kollinearere Pfade zu richten), so dass sie in den nichtlinearen Kristall 607 eintreten. Der nichtlineare Kristall 607 ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Leitsignal 118 durch stimulierte Frequenzkonversion des Basislichtanteils 127 zu verstärken, und das verstärkte Signal zu Strahlteiler (Wellenlängentrenner) 621 zu transmittieren. Der Strahlteiler 621 ist dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Signal 129 von anderen Frequenzen zu trennen, die im verstärkten, vom nichtlinearen Kristall 607 empfangenen Signal vorliegen, und das frequenzkonvertierte Signal 129 zum Frequenzmischungsmodul (nicht gezeigt) zu richten. Jede dieser Komponenten wird in den folgenden Absätzen detaillierter beschrieben.

[0054] In einer bevorzugten Ausführungsform wird der Leitlaser 603 unter Verwendung eines Diodenlasers oder eines Faserlasers niedrigerer Leistung implementiert, und ist dazu ausgebildet, das Leitlaserlicht 604 bei der herabgesetzten Signalfrequenz ω_s zu erzeugen, welches dann verwendet wird, den Frequenzkonversionsprozess bei dieser Frequenz zu speisen. Der Leitlaser 603 braucht lediglich eine Durchschnittsleistung von ungefähr 1 mW bis einige wenige Hundert mW. In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Leitlaser 603 stabilisiert, indem beispielsweise ein Gitter benutzt und die Temperatur stabilisiert wird. Frequenz und Bandbreite des Leitlasers bestimmen die Frequenz und die Bandbreite des frequenzkonvertierten Signals 129. Ein Vorteil der Verwendung eines Leitlasers ist, dass es viel ein-

facher ist, die Stabilität und Bandbreite eines Lasers niedrigerer Leistung zu steuern als eines Lasers hoher Leistung. Ein stabiler, schmalbandiger Leitlaser bestimmt die Bandbreite und Stabilität des frequenzkonvertierten Signals 129. In einer Ausführungsform erzeugt der Leitlaser 603 polarisiertes Licht, das dann in den nichtlinearen Konverter 607 eingebracht wird, im Wesentlichen senkrecht zu der Polarisation der Basis, d.h. des Eingangslaserlichts 127.

[0055] In einer Ausführungsform beinhaltet der Strahlkombinierer 611 (z.B. ein Prisma) eine dichroitische Beschichtung, welche eine erste Wellenlänge effizient reflektiert, während sie eine zweite Wellenlänge transmittiert, so dass Basislichtanteil 127 und transmittiertes Leitlaserlicht 1180 im Wesentlichen kollinear durch den nichtlinearen Konverter 607 laufen. Beispielsweise reflektiert, wie in Fig. 6A gezeigt, der Strahlkombinierer 611 den Basislichtanteil 127 und transmittiert Leitlaserlicht 118D, so dass beide, wie gezeigt, im Wesentlichen kollinear durch den nichtlinearen Konverter 607 transmittiert werden. In einer alternativen Ausführungsform (nicht gezeigt) ist der Strahlkombinierer dazu ausgebildet und angeordnet, den Basislichtanteil zu transmittieren und das Leitlaserlicht zu reflektieren, so dass beide im Wesentlichen kollinear durch den nichtlinearen Konverter laufen.

[0056] In einer Ausführungsform wird der nichtlineare Kristall 607 implementiert unter Verwendung jeglichen geeigneten nichtlinearen optischen Kristalls oder periodisch gepolten nichtlinearen optischen Kristalls, der in der Phase für die Eingangslaserfrequenz ω und die herabgesetzte Signalfrequenz ω_s angepasst oder quasi-angepasst sein kann. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der nichtlineare Kristall 607 einen der folgenden: periodisch gepoltes Lithiumniobat, periodisch gepoltes mit Magnesiumoxid dotiertes Lithiumniobat, periodisch gepoltes stöchiometrisches Lithiumtantalat (PPSLT), periodisch gepoltes mit Magnesiumoxid dotiertes stöchiometrisches Lithiumtantalat und periodisch gepoltes Kaliumtitanylphosphat (PPKTP).

[0057] In einer Ausführungsform ist der Strahlteiler 621 (z.B. ein Prisma) unter Anwendung bekannter Lehre dazu ausgebildet und angeordnet, das frequenzkonvertierte Signal 129 von unerwünschten Frequenzen 623 (z.B. unverbrauchte Basis und ein Mitläufer) zu trennen. In einer Ausführungsform (nicht gezeigt) kann die unverbrauchte Basis zum Eingang des nichtlinearen Konverters 607 zurückgeführt werden, mit einer Zeitverzögerung, die so eingestellt ist, dass sie zum nächsten eintreffenden Laserpuls des Basislichtanteils 127 passt.

[0058] Fig. 6B zeigt ein OPS 116E gemäß einer zweiten beispielhaften Ausführungsform, das ein fre-

quenzkonvertiertes Signal 129 hoher Leistung (etwa mehr als ungefähr 3W) bei der erforderlichen herabgesetzten Signalfrequenz ω_s erzeugt, indem es einen Teil des Basislaserlichts frequenzkonvertiert. Das OPS 116E beinhaltet allgemein einen Strahlteiler 631, der dazu ausgebildet ist, den Basislichtanteil 127 bei der Basisfrequenz ω in einen ersten Unterteil 127A und einen zweiten Unterteil 127B aufzuteilen, einen Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO; d.h. Erzeuger eines frequenzkonvertierten Leitsignals) 117E, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal 118E zu erzeugen, indem er den Basislichtunterteil 127A frequenzkonvertiert, und einen OPA 119E, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal 118E mit (dem zweiten) Basislichtunterteil 127B zu mischen. Der OPO 117E beinhaltet einen ersten Fokussierspiegel 632, einen nichtlinearen Kristall 633, einen zweiten Fokussierspiegel 634, einen Wellenlängenselektor 637 und einen Auskoppler 636, welche wie gezeigt funktionell ausgebildet sind, um eine optische Kavität zu bilden, in der Licht zwischen dem Wellenlängenselektor 637 und dem Auskoppler 636 über die Fokussierspiegel 632 und 634 sowie den nichtlinearen Kristall 633 reflektiert wird. Ähnlich dem OPA des OPS 1160 (Fig. 6A) beinhaltet OPA 119E einen Strahlkombinierer 640, einen nichtlinearen Kristall 641 und einen Wellenlängentrenner 642. Jede dieser Komponenten wird in den folgenden Absätzen detaillierter beschrieben.

[0059] Mit Verweis auf die linke Seite der Fig. 6B wird in einer Ausführungsform der Basislichtanteil (Eingangslaserlicht) 127 bei der Basisfrequenz ω durch Strahlteiler 631 so geteilt, dass der zum OPO 117E gerichtete Unterteil 127A weniger als 50% der Energie des Eingangslaserlichts 127 beinhaltet, und der zum OPA 119E gerichtete Unterteil 127B mehr als 50% der Energie des Eingangslaserlichts 127 beinhaltet. Der Unterteil 127A tritt in den OPO 117E ein, indem er durch den Fokussierspiegel 632 läuft. Fokussier- oder Modenanpassungsoptiken (nicht gezeigt) können in den Strahlengang des Eingangslaserlichts 127 vor den OPO 117E eingebracht werden, um den Unterteil 127A nahe dem Zentrum des nichtlinearen Kristalls 633 zu fokussieren.

[0060] Der nichtlineare Kristall 633 ist zur Phasenanpassung oder Quasi-Phasenanpassung ausgelegt, um Licht bei der Signalfrequenz ω_s aus dem Unterteil 127A bei der Frequenz ω zu erzeugen. In einer Ausführungsform umfasst der nichtlineare Kristall 633 ein periodisch gepoltes Material, etwa periodisch gepoltes Lithiumniobat (PPLN) oder periodisch gepoltes stöchiometrisches Lithiumtantalat (PPSLT). Jegliches Eingangslaserlicht, das nicht durch den nichtlinearen Kristall 633 zu Licht der Signalfrequenz konvertiert wird, durchläuft den Fokussierspiegel 634 und kann verworfen werden. Der Fokussierspiegel 634 sollte vorzugsweise auch die Mitläuferfrequenz

transmittieren, die im nichtlinearen Kristall 633 erzeugt wird.

[0061] In einer Ausführungsform ist der Fokussierspiegel 634 dazu ausgebildet, für Licht bei der Signalfrequenz ω_s hoch reflektierend zu sein, und dazu angeordnet, Licht bei der Signalfrequenz, das im nichtlinearen Kristall 633 erzeugt wird oder durch diesen läuft, zu Auskoppler 636 zu richten. Der Auskoppler 636 transmittiert einen ersten Anteil (etwa einen Anteil von ungefähr 20%) des auf ihn bei der Signalfrequenz ω_s einfallenden Lichts, und reflektiert einen zweiten Anteil des Lichts (etwa ungefähr 80%). Der zweite Anteil des Lichts bei der Signalfrequenz ω_s wird zum Fokussierspiegel 634 zurückreflektiert, welcher das Licht durch den nichtlinearen Kristall 633 zum Fokussierspiegel 632 richtet, welcher das Licht wiederum zum Wellenlängenselektor 637 richtet.

[0062] Der Wellenlängenselektor 637 ist unter Verwendung bekannter Lehre dazu ausgebildet, für einen schmalen um die gewünschte Signalfrequenz ω_s zentrierten Frequenzbereich hoch reflektierend zu sein. Beispielsweise kann der Wellenlängenselektor 637 einen Wellenlängenbereich von ungefähr 0,2 nm FWHM reflektieren. Wellenlängenselektor 637 ist wichtig für die Festlegung der Wellenlänge des Laserausgangs 140 (siehe z.B. Fig. 1a), da die Wellenlänge des Laserausgangs 140 die Wellenlänge ist, die der Summe aus der fünften Harmonischen der Basisfrequenz und der Signalfrequenz ω_s entspricht. In einer Ausführungsform umfasst der Wellenlängenselektor 637 ein Bragg-Volumengitter. In einer bevorzugten Ausführungsform wird der Wellenlängenselektor 637 bei einer konstanten Temperatur gehalten, um sicherzustellen, dass seine zentrale Wellenlänge konstant bleibt. In einer Ausführungsform können kleine Anpassungen an der Wellenlänge des Laserausgangs 140 vorgenommen werden, indem die Temperatur des Wellenlängenselektors 637 angepasst wird, um die Signalfrequenz ω_s zu ändern.

[0063] Das frequenzkonvertierte Licht bei der Signalfrequenz ω_s kehrt nach Reflektion vom Wellenlängenselektor 637 zum Fokussierspiegel 632 zurück, welcher es zurück zum nichtlinearen Kristall 633 richtet. Die vom Licht bei der Signalfrequenz ω_s durchlaufene optische Weglänge vom nichtlinearen Kristall 633 zum Fokussierspiegel 634 zum Auskoppler 636, zurück zum Fokussierspiegel 634 durch den nichtlinearen Kristall 633 zum Fokussierspiegel 632, zum Wellenlängenselektor 637, zurück zum Fokussierspiegel 632 und zurück zum nichtlinearen Kristall 633 sollte derart sein, dass jeder Lichtpuls bei der Signalfrequenz ω_s im Wesentlichen gleichzeitig mit einem Puls des Eingangslaserlichts 127 wieder beim nichtlinearen Kristall 633 ankommt. Diese Anordnung wird verwendet, um sicherzustellen, dass Pulse des Eingangslaserlichts 127 und des

Lichts bei der Signalfrequenz im Wesentlichen zusammen durch den nichtlinearen Kristall 633 laufen, um stimulierte Frequenzkonversion des Eingangslaserlichts zu Licht bei der Signalfrequenz ω_s zu ermöglichen. In einer bevorzugten Ausführungsform sollte die optische Weglänge derart sein, dass eine Abweichung in den Ankunftszeiten von Pulsen von Licht bei der Signalfrequenz ω_s und von Pulsen des Eingangslaserlichts 127 weniger als ungefähr 10% einer Pulsbreite des Eingangslaserlichts 127 ist.

[0064] In einer Ausführungsform sind die Fokussierspiegel 632 und 634 dazu ausgebildet, Brennweiten aufzuweisen, die so eingestellt sind, dass Lichtpulse bei der Signalfrequenz nach dem kompletten eben beschriebenen Umlauf wieder beim nichtlinearen Kristall 633 ankommen, nahe dem Zentrum des nichtlinearen Kristalls fokussiert und im Wesentlichen räumlich überlappt mit Pulsen des Eingangslaserlichts 127. In alternativen Ausführungsformen können der Wellenlängenselektor 637 und/oder der Auskoppler 636 Licht bei der Signalfrequenz ω_s fokussieren, an Stelle von oder zusätzlich zu den Fokussierspiegeln 632 und 634. In einer anderen Ausführungsform können ein oder mehrere Linsen verwendet werden, um die Signalfrequenz wieder zu fokussieren, an Stelle der oder zusätzlich zu den Fokussierspiegeln.

[0065] Man beachte auch, dass die Relativpositionen des Auskopplers 636 und des Wellenlängenselektors 637 vertauscht werden könnten, soweit geeignete Änderungen des Aufbaus vorgenommen werden, um zusätzliche Spiegel und/oder Prismen einzuschließen, um Licht bei der Signalfrequenz ω_s und den zweiten Anteil des Eingangslaserlichts 127B zum Strahlkombinierer 640 umzulenken. Der in **Fig. 6B** gezeigte Aufbau ist dazu gedacht, die Prinzipien der Funktion zu erläutern.

[0066] Andere bekannte OPO-Konfigurationen können an Stelle des OPO 117E verwendet werden. Beispielsweise kann ein OPO mit Ringkavität oder mit Schleifen-Kavität benutzt werden. Andere Modifikationen können am OPO 117E vorgenommen werden, ohne vom Umfang der vorliegenden Offenbarung abzuweichen. Beispielsweise kann ein Spiegel an Stelle des Wellenlängenselektors 637 verwendet werden, und ein transmittierender Wellenlängenselektor (nicht gezeigt) könnte in den optischen Weg der Signalfrequenz ω_s aufgenommen werden. Zusätzliche flache Spiegel oder Prismen können im OPO 117E enthalten sein, beispielsweise um die gewünschte optische Weglänge zu erzielen und zugleich eine kompakte Größe beizubehalten.

[0067] Für einen Laserausgang 140 hoher Leistung, etwa einer Leistung von 1 W oder darüber, ist es bevorzugt, die Signalwellenlänge ω_s direkt aus dem Basislaserlicht zu erzeugen, anstatt aus der zweiten

Harmonischen der Basis, da weniger Leistung verschwendet wird und daher ein Basislaser 102 (z.B. **Fig. 1A**) niedrigerer Leistung für eine gegebene Ausgangsleistung verwendet werden kann. Im Allgemeinen kann ein OPO in der Lage sein, eine hohe durchschnittliche Ausgangsleistung der Signalfrequenz ω_s zu erzeugen, etwa eine Leistung von einigen Watt oder mehr, wie es erforderlich ist, um ungefähr 1 W oder mehr an Laserausgang 140 zu erzeugen. Die vorliegende Offenbarung ist darauf gerichtet, einen Laserausgang 140 mit einer Wellenlänge zwischen ungefähr 180 nm und 185 nm aus einer Basiswellenlänge nahe 1 μm zu erzeugen. Dies erfordert eine Signalfrequenz ω_s , welche einer Wellenlänge zwischen ungefähr 1,2 μm und ungefähr 1,6 μm entspricht (einige Beispiele von Wellenlängenkombinationen werden in **Fig. 3** gezeigt). Eine im Vergleich zur Wellenlänge des Basislasers derart kurze Wellenlänge zu erzeugen bedeutet, dass der zusammen mit der Signalfrequenz erzeugte Mitläufer eine große Wellenlänge haben muss, etwa eine Wellenlänge größer als ungefähr 4 μm . Leicht verfügbare nichtlineare Kristalle mit hoher Verstärkung und von hoher Qualität, die geeignet sind, Signalwellenlängen zwischen ungefähr 1,2 μm und ungefähr 1,6 μm aus einer Wellenlänge nahe 1 μm zu erzeugen, etwa PPLN und PPSLT, sind bei Wellenlängen über ungefähr 4 μm stark absorbierend. Würde OPO 117E verwendet, um hohe Leistung bei einer Signalfrequenz im gewünschten Bereich zu erzeugen, so würde auch der Mitläufer signifikante Leistung beinhalten. Aufgrund der Absorption des Mitläufers durch den nichtlinearen Kristall 633 werden bei hoher Leistung des Mitläufers signifikante Temperaturgradienten innerhalb des nichtlinearen Kristalls 633 erzeugt. Diese Temperaturgradienten ändern lokal die optischen Eigenschaften des nichtlinearen Kristalls 633, was zu einem unregelmäßigen Profil für das bei der Signalfrequenz ω_s erzeugte Licht führt, und wahrscheinlich zu einem instabilen Betrieb des OPO 117E.

[0068] Bei der vorliegenden Offenbarung werden diese Probleme überwunden, indem OPO 117E so betrieben wird, dass eine relativ niedrige Ausgangsleistung bei der Signalfrequenz ω_s erzeugt wird, etwa eine Durchschnittsleistung von einigen Hundert mW. Bei solch einer Ausgangsleistung ist die lokale Erwärmung des nichtlinearen Kristalls 633 minimal, und der OPO 117E kann stabil mit gutem Profil für das frequenzkonvertierte Leitsignal 118E arbeiten. Der nichtlineare Kristall 633 kann so gewählt werden, dass die Konversionseffizienz maximiert wird, beispielsweise indem eine große Länge eines Materials mit einem hohen nichtlinearen Koeffizienten, etwa PPLN oder PPSLT, gewählt wird, mit weniger Rücksicht auf Beschädigung oder thermische Eigenschaften.

[0069] In der vorliegenden Offenbarung wird Licht bei der Signalfrequenz ω_s 118E, das vom OPO 117E erzeugt wurde, durch OPA 119E zu dem erforderlichen Leistungsniveau als ein frequenzkonvertiertes Signal 129 verstärkt. Strahlkombinierer 640 kombiniert den zweiten Teil des Eingangslaserlichts 127 mit Licht bei der Signalfrequenz ω_s vom OPO 117E. Die optische Weglänge vom Strahlteiler 631 zum Strahlkombinierer 640 sollte so sein, dass Pulse des Eingangslaserlichts beim Strahlkombinierer 640 im Wesentlichen zur selben Zeit eintreffen, wie Pulse von Licht bei der Signalfrequenz ω_s . Zusätzliche Spiegel, Prismen oder andere optische Komponenten können in den optischen Weg zwischen 631 und 640 und/oder den optischen Weg zwischen 636 und 640 eingebracht werden, um sicherzustellen, dass Pulse bei 640 im Wesentlichen gleichzeitig eintreffen. Linsen, gekrümmte Spiegel oder andere optische Elemente (nicht gezeigt) können in jedem Lichtweg nach Bedarf verwendet werden, um sicherzustellen, dass der zweite Teil des Eingangslaserlichts 127 und das Licht bei der Signalfrequenz ω_s im Wesentlichen räumlich überlappt und beide nahe dem Zentrum des nichtlinearen Kristalls 641 fokussiert sind.

[0070] Strahlteiler 640 richtet Lichtpulse auf den nichtlinearen Kristall 641. Der nichtlineare Kristall 641 verstärkt Licht bei der Signalfrequenz ω_s durch stimulierte Frequenzkonversion des zweiten Basislicht-Unterteils 127B. Der Wellenlängentrenner 642 trennt das frequenzkonvertierte Signal 129 von jeglichem unverbrauchtem Eingangslaserlicht 643 und jeglichem Mitläufer. Der Wellenlängenseparator 642 kann einen polarisierten Strahlteiler (falls das frequenzkonvertierte Signal 129 eine vom Eingangslaserlicht verschiedene Polarisierung hat), einen dichroitischen Spiegel, ein Pellin-Broca-Prisma oder jeglichen anderen geeigneten bekannten Wellenlängenseparator umfassen. Der nichtlineare Kristall 641 kann jeden geeigneten nichtlinearen optischen Kristall umfassen, der für die Eingangslaserfrequenz ω und die herabgesetzte Signalfrequenz ω_s phasen anpassen oder quasi-phasen anpassen kann. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der nichtlineare Kristall 641 PPSLT oder periodisch gepoltes Mg-dotiertes SLT. Diese Materialien sind für den Betrieb bei höheren Leistungsniveaus besonders geeignet.

[0071] Da das frequenzkonvertierte Signal 129 den nichtlinearen Kristall 641 nur einmal durchläuft, verursachen die thermischen Gradienten im Kristall 641 weniger Verschlechterung des Profils des Lichts, als in einem OPO verursacht würde, der dazu ausgebildet ist, eine ähnliche Ausgangsleistung zu erzeugen. Das heißt, wenn OPA 119E durch einen OPO (z.B. ausgebildet wie OPO 117E) ersetzt würde, müsste Licht bei der Signalfrequenz ω_s mehrfach durch sei-

nen nichtlinearen Kristall (z.B. den nichtlinearen Kristall 633 im OPO 117E) laufen, was zu einer signifikanten Erwärmung durch den Mitläufer führen würde. Somit überwindet die vorliegende Offenbarung eine signifikante Beschränkung bei Verwendung lediglich eines OPOs um ein frequenzkonvertiertes Signal 129 hoher Leistung zu erzeugen, indem ein zweistufiger Ansatz verwendet wird, bei dem zunächst ein Leitsignal niedrigerer Leistung erzeugt wird, und dann das Leitsignal mit einem Teil des Basislichts gemischt wird, um das frequenzkonvertierte Signal 129 bei der erforderlichen Frequenz und dem erforderlichen Leistungsniveau zu erzeugen.

[0072] Mit Verweis auf **Fig. 1B** ist, wie oben erwähnt, die Laseranordnung 100B der Laseranordnung 100A (**Fig. 1A**) darin ähnlich, dass beide Laseranordnungen einen Basislaser 102 beinhalten, der dazu ausgebildet ist, Basislicht 128 mit einer Basiswellenlänge ω zu erzeugen, ein OPS 116, das optisch gekoppelt ist, um einen Teil 127 des Basislichts 128 zu empfangen und ein frequenzkonvertiertes Signal 129 zu erzeugen, ein Fünfte-Harmonische-Modul 157, und ein Frequenzmischungsmodul 104, das dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Signal 129 und Laserlicht der fünften Harmonischen 134 vom Erzeuger einer fünften Harmonischen 157 zu empfangen und zu mischen, um Laserausgangslicht 140 zu erzeugen. Zusätzlich erzeugt OPS 116 das frequenzkonvertierte Signal 129 indem DCSSG 117 verwendet wird, um das frequenzkonvertierte Leitsignal 118 niedrigerer Leistung bei der herabgesetzten Wellenlänge ω_s zu erzeugen und dann das frequenzkonvertierte Leitsignal 118 mit dem Basislichtanteil 127 zu mischen.

[0073] Ein erster Unterschied zwischen der Laseranordnung 100B und der Laseranordnung 100A (**Fig. 1A**) ist, dass die Gesamtheit des vom Basislaser 102 erzeugten Basislichts 128 zu einem Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 transmittiert wird, und Anteile 127 und 130, die ins OPS 116 und das Fünfte-Harmonische-Modul 157 gespeist werden, von unbenutztem Basislicht 182 erhalten werden, welches aus dem Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 austritt. Dieser Ansatz zeigt eine vorteilhafte Alternative für Fälle, in denen der Basislaser 102 zweites Basislicht und unbenutztes Basislicht ausgibt (d.h. in denen der Basislaser das Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 praktisch beinhaltet). Um diese Alternative zu ermöglichen, wird ein erster Strahlteiler 181 verwendet, um Licht der zweiten Harmonischen 189, welches aus dem Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 austritt, von unbenutztem Basislicht 182 zu trennen, so dass Licht der zweiten Harmonischen 189 zu einem Modul zur Erzeugung einer vierten Harmonischen 155 transmittiert wird, und so dass unbenutztes Basislicht 182 zu

einem zweiten Strahlteiler 183 transmittiert wird, der die Anteile 127 und 130 erzeugt, die zu OPS 116 bzw. zum Fünfte-Harmonische-Modul 157 gerichtet werden.

[0074] Abgesehen von den oben erwähnten Unterschieden ist die Arbeitsweise der Laseranordnung 100B im Wesentlichen die gleiche wie die der Laseranordnung 100A. Das Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 arbeitet im Wesentlichen ähnlich und kann ähnlich ausgebildet sein, wie das erste Frequenzverdopplungsmodul 202 (**Fig. 2**). Das Modul zur Erzeugung einer vierten Harmonischen 155 arbeitet im Wesentlichen ähnlich und kann ähnlich ausgebildet sein, wie das zweite Frequenzverdopplungsmodul 203 (**Fig. 2**). Das Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 157 arbeitet im Wesentlichen ähnlich und kann ähnlich ausgebildet sein, wie das Frequenzsummiermodul 204 (**Fig. 2**). Anders ausgedrückt führen die Module 153, 155 und 157 im Wesentlichen die gleiche Funktion aus wie das Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 103, aber mit einer verschiedenen Führung der Basis zwischen den verschiedenen Modulen.

[0075] Die **Fig. 7-12** zeigen Systeme, die einen der oben beschriebenen 183-nm-Laser beinhalten können. Diese Systeme können bei der Inspektion von Photomasken, Retikeln oder Wafern und bei Metrologieanwendungen verwendet werden.

[0076] **Fig. 7** zeigt ein Inspektionssystem 700 für Retikel, Photomasken oder Wafer, welches gleichzeitig zwei Bild- oder Signalkanäle bei Verwendung eines einzigen Sensors 770 detektiert. Die Beleuchtungsquelle (Laseranordnung) 709 ist dazu ausgebildet, Laserausgangslicht 710 zu erzeugen, welches eine Ausgangswellenlänge im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm (z.B. 183 nm) hat, wie hierin beschrieben. Die Beleuchtungsquelle 709 kann ferner einen Pulswiederholungsraten-Vervielfacher und/oder eine Kohärenzreduktionseinrichtung umfassen. Die beiden Bild-/Signalkanäle können reflektiertes und transmittiertes Licht umfassen, wenn ein inspiziertes Objekt, das auf einem Tisch 730 abgelegt wird, transparent ist (zum Beispiel ein Retikel oder eine Photomaske), oder können zwei unterschiedliche Beleuchtungsmodi umfassen, z.B. Einfallswinkel, Polarisationszustände, Wellenlängenbereiche oder eine Kombination daraus.

[0077] Wie in **Fig. 7** gezeigt, beinhaltet das Inspektionssystem 700 Beleuchtungsrelaisoptiken (erste Optiken) 715 und 720, welche optische Systeme sind, die unter Verwendung bekannter Lehre dazu ausgebildet sind, die Beleuchtung (Laserausgangslicht) 710 von der Quelle 709 zum inspizierten Objekt weiterzuleiten, welches sich auf dem Tisch 730 befindet. Das inspizierte Objekt kann ein Retikel, eine

Photomaske, ein Halbleiterwafer oder ein anderer zu inspizierender Artikel sein. Das Inspektionssystem 700 beinhaltet auch die Bildrelaisoptiken (zweite Optiken) 740, 755 und 760, welche optische Systeme sind, die unter Verwendung bekannter Lehre dazu ausgebildet sind, einen Teil 710' der Beleuchtung 710, der von dem inspizierten Objekt beeinflusst ist (d.h. davon reflektiert, gestreut und/oder transmittiert ist), zu einem Sensor 770 weiterzuleiten. Die Daten, welche den detektierten Signalen oder Bildern für die beiden Kanäle entsprechen, sind als Daten 780 gezeigt und werden zu einem Computer (nicht gezeigt) zur Verarbeitung transmittiert.

[0078] Andere Details eines Inspektionssystems für Retikel oder Photomasken, das dazu ausgebildet sein kann, transmittiertes und reflektiertes Licht von dem Retikel oder der Photomaske zu messen, werden in den US-Patenten 5,563,702 an Emery et al., 7,352,457 an Kvamme et al. und 7,528,943 an Brown et al. beschrieben, welche durch Verweis hierin aufgenommen werden.

[0079] **Fig. 8** zeigt ein beispielhaftes Inspektionssystem 800, das mehrere Objektive und eine der oben beschriebenen 183-nm-Laseranordnungen beinhaltet. Im System 800 wird Beleuchtung von einer Laserquelle 801 zu mehreren Sektionen des Beleuchtungssubsystems gesendet. Eine erste Sektion des Beleuchtungssubsystems beinhaltet Elemente 802a bis 806a. Linse 802a fokussiert Licht von der Laserquelle 801. Licht von der Linse 802a wird dann vom Spiegel 803a reflektiert. Der Spiegel 803a ist zum Zwecke der Darstellung an diese Stelle gesetzt, und kann anderswo platziert werden. Licht vom Spiegel 803a wird dann durch Linse 804a gesammelt, welche die Beleuchtungspupillenebene 805a bildet. Eine Blende, ein Filter, oder eine andere Einrichtung zur Modifizierung des Lichts kann in der Pupillenebene 805a angeordnet werden, abhängig von den Erfordernissen des Inspektionsmodus. Licht von der Pupillenebene 805a läuft dann durch Linse 806a und bildet Beleuchtungsfeldebene 807.

[0080] Eine zweite Sektion des Beleuchtungssubsystems beinhaltet die Elemente 802b bis 806b. Die Linse 802b fokussiert Licht von Laserquelle 801. Licht von der Linse 802b wird dann vom Spiegel 803b reflektiert. Licht vom Spiegel 803b wird dann durch Linse 804b gesammelt, welche die Beleuchtungspupillenebene 805b bildet. Eine Blende, ein Filter, oder eine andere Einrichtung zur Modifizierung des Lichts kann in der Pupillenebene 805b angeordnet werden, abhängig von den Erfordernissen des Inspektionsmodus. Licht von der Pupillenebene 805b läuft dann durch Linse 806b und bildet Beleuchtungsfeldebene 807. Das Licht von der zweiten Sektion wird dann durch einen Spiegel oder eine reflektierende Oberfläche umgelenkt, so dass die Beleuchtungsfeldlichtenergie in der Beleuchtungs-

feldebene 807 die kombinierten Beleuchtungssektionen umfasst.

[0081] Licht aus der Feldebene wird dann durch Linse 809 gesammelt, ehe es von einem Strahlteiler 810 reflektiert wird. Die Linsen 806a und 809 bilden ein Bild der ersten Beleuchtungspupillenebene 805a in der Objektivpupillenebene 811. Ebenso bilden die Linsen 806b und 809 ein Bild der zweiten Beleuchtungspupillenebene 805b in der Objektivpupillenebene 811. Ein Objektiv 812 (oder alternativ 813) erfasst dann das Pupillenlicht und bildet ein Bild des Beleuchtungsfeldes 807 bei der Probe 814. Objektiv 812 oder Objektiv 813 können nahe der Probe 814 positioniert sein. Probe 814 kann sich auf einem Tisch (nicht gezeigt) bewegen, der die Probe an der gewünschten Stelle positioniert. Von der Probe 814 reflektiertes und gestreutes Licht wird von dem katioptrischen Objektiv 812 mit hoher NA oder Objektiv 813 gesammelt. Nach dem Bilden einer reflektierten Lichtpupille in der Objektivpupillenebene 811 läuft Lichtenergie durch Strahlteiler 810 und Linse 815, ehe sie ein internes Feld 816 in dem Abbildungssystem bildet. Dieses interne Abbildungsfeld ist ein Bild der Probe 814 und dementsprechend des Beleuchtungsfeldes 807. Dieses Feld kann räumlich in mehrere Felder getrennt sein, entsprechend den Beleuchtungsfeldern. Jedes dieser Felder kann einen separaten Abbildungsmodus bedienen. Beispielsweise kann ein Abbildungsmodus ein Hellfeldabbildungsmodus sein, während ein anderer ein Dunkelfeldabbildungsmodus sein kann.

[0082] Eines dieser Felder kann unter Verwendung von Spiegel 817 umgelenkt werden. Das umgelenkte Licht läuft dann durch Linse 818b, ehe es eine andere Abbildungspupille 819b bildet. Diese Abbildungspupille ist ein Bild der Pupille 811 und dementsprechend der Beleuchtungspupille 805b. Eine Blende, ein Filter oder eine andere Einrichtung zur Modifizierung des Lichts kann in der Pupillenebene 819b platziert werden, abhängig von den Erfordernissen des Inspektionsmodus. Licht von der Pupillenebene 819b läuft dann durch Linse 820b und bildet ein Bild auf Sensor 821b. In ähnlicher Weise wird Licht, das über Spiegel oder reflektierende Oberfläche 817 läuft, durch Linse 818a gesammelt und bildet Abbildungspupille 819a. Licht von der Abbildungspupille 819a wird dann durch Linse 820a gesammelt, ehe es ein Bild auf Detektor 821a bildet. Auf den Detektor 821a abgebildetes Licht kann für einen anderen Abbildungsmodus verwendet werden als das auf Sensor 821 b abgebildete Licht.

[0083] Das im System 800 eingesetzte Beleuchtungssystem setzt sich aus der Laserquelle 801, der Sammeloptik 802-804, Strahlformungskomponenten, die nahe einer Pupillenebene 805 platziert sind, und Relaisoptiken 806 und 809 zusammen. Eine interne Feldebene 807 befindet sich zwischen

Linsen 806 und 809. In einer bevorzugten Konfiguration kann die Laserquelle 801 einen der oben beschriebenen 183-nm-Laser beinhalten.

[0084] Die Laserquelle 801, wenn auch als einzelner gleichförmiger Block mit zwei Transmissionspunkten oder -winkeln dargestellt, repräsentiert in Wirklichkeit eine Laserquelle, die zwei Beleuchtungskanäle bereitstellen kann, beispielsweise einen ersten Kanal für Lichtenergie, etwa Laserlichtenergie bei einer ersten Frequenz (z.B. eine Wellenlänge im tiefen UV nahe 183 nm), welche durch die Elemente 802a-806a läuft, und einen zweiten Kanal für Lichtenergie, etwa Laserlichtenergie bei einer zweiten Frequenz (z.B. einer anderen Harmonischen, etwa der vierten oder fünften Harmonischen, von dem gleichen Laser oder ein Licht von einem anderen Laser), welche durch die Elemente 802b-806b läuft.

[0085] Wenn auch die Lichtenergie von der Laserquelle 801 so gezeigt ist, dass sie 90 Grad voneinander emittiert wird, und die Elemente 802a-806a und 802b-806b unter 90-Grad-Winkeln orientiert sind, kann Licht in Wirklichkeit bei verschiedenen Orientierungen emittiert werden, nicht notwendigerweise in zwei Dimensionen, und die Komponenten können anders als gezeigt orientiert sein. **Fig. 8** ist daher einfach eine Darstellung der eingesetzten Komponenten, und die gezeigten Winkel oder Abstände sind weder maßstäblich noch speziell für das Design erforderlich.

[0086] Nahe der Pupillenebene 805a/805b angeordnete Elemente können im vorliegenden System eingesetzt werden und das Konzept der Aperturformung verwenden. Bei Verwendung dieses Designs kann eine gleichförmige oder nahezu gleichförmige Beleuchtung erzielt werden, ebenso wie die Beleuchtung einzelner Punkte, Ringbeleuchtung, Quadrupolbeleuchtung oder andere wünschenswerte Muster.

[0087] Verschiedene Implementierungen der Objektive können in einem allgemeinen Abbildungssystem eingesetzt werden. Es kann ein einziges fixiertes Objektiv verwendet werden. Das einzige Objektiv kann alle gewünschten Abbildungs- und Inspektionsmodi unterstützen. Solch ein Design ist möglich, wenn das Abbildungssystem eine relativ große Feldgröße und eine relativ hohe numerische Apertur unterstützt. Die numerische Apertur kann durch Verwendung interner Blenden, die in den Pupillenebenen 805a, 805b, 819a und 819b platziert werden, auf einen gewünschten Wert reduziert werden.

[0088] Es können auch, wie in **Fig. 8** gezeigt, mehrere Objektive verwendet werden. Zum Beispiel ist, obwohl zwei Objektive 812 und 813 gezeigt sind, jede Anzahl möglich. Jedes Objektiv in solch einem

Design kann für jede von der Laserquelle 801 erzeugte Wellenlänge optimiert sein. Diese Objektive 812 und 813 können entweder fixierte Positionen haben oder nahe der Probe 814 in Position gebracht werden. Um mehrere Objektive nahe der Probe zu bewegen, können Revolver verwendet werden, wie sie bei Standardmikroskopen üblich sind. Andere Designs zum Bewegen von Objektiven nahe einer Probe sind verfügbar, einschließlich, aber ohne darauf beschränkt zu sein, die Objektive lateral auf einem Tisch in einer Translation zu bewegen, und die Objektive in einem Bogen unter Verwendung eines Goniometers zu bewegen. Zusätzlich ist jede Kombination aus fixierten Objektiven und mehreren Objektiven auf einem Revolver gemäß dem vorliegenden System möglich.

[0089] Die maximalen numerischen Aperturen dieser Konfiguration können 0,97 erreichen oder überschreiten, aber können in bestimmten Fällen kleiner sein. Der weite Bereich an Beleuchtungs- und Sammelwinkeln, der mit diesem katadioptrischen Abbildungssystem hoher NA möglich ist, in Kombination mit seiner großen Feldgröße, erlaubt es dem System gleichzeitig mehrere Inspektionsmodi zu unterstützen. Wie den vorangehenden Abschnitten entnommen werden kann, können unter Verwendung eines einzigen optischen Systems oder einer einzigen optischen Maschine in Verbindung mit der Beleuchtungseinrichtung mehrere Abbildungsmodi implementiert werden. Die für Beleuchtung und Sammlung offenbarte hohe NA erlaubt die Implementierung von Abbildungsmodi unter Verwendung des gleichen optischen Systems, und ermöglicht dadurch die Optimierung der Abbildung für unterschiedliche Arten von Defekten oder Proben.

[0090] Das Abbildungssystem beinhaltet auch zwischengeschaltete Bildformungsoptik 815. Der Zweck der Bildformungsoptik 815 ist es, ein internes Bild 816 der Probe 814 zu formen. Bei diesem internen Bild 816 kann ein Spiegel 817 angeordnet werden, um Licht umzulenken, das einem der Inspektionsmodi entspricht. Es ist möglich, das Licht an dieser Stelle umzulenken, weil das Licht für die Abbildungsmodi räumlich getrennt ist. Die Bildformungsoptik 818 (818a und 818b) und 820 (820a und 820b) kann in mehreren verschiedenen Weisen implementiert werden, darunter ein Zoom mit variablem Fokus, mehrere afokale Tubuslinsen mit Fokussieroptik, oder mehrere bildformende vergrößernde Tubi. US-Patent 7,957,066, ausgegeben am 07. Juni 2011 und hierin durch Verweis eingeschlossen, beschreibt zusätzliche Details hinsichtlich System 800.

[0091] Fig. 9 zeigt ein beispielhaftes katadioptrisches Abbildungssystem 900, das als ein Inspektionssystem mit Hellfeld- und Dunkelfeld-Inspektionsmodi ausgebildet ist. Das System 900 kann

zwei Beleuchtungsquellen beinhalten: einen Laser 901 und ein Breitbandlichtbeleuchtungsmodul 920. In einer Ausführungsform kann der Laser 901 einen 183-nm-Laser, wie er hierin beschrieben ist, beinhalten.

[0092] In einem Dunkelfeldmodus wird Licht vom Laser 901 zu Anpassungsoptik 902 gerichtet, welche die Strahlgröße und das Strahlprofil der Laserbeleuchtung auf der inspizierten Oberfläche steuert. Das mechanische Gehäuse 904 beinhaltet eine Blende und Fenster 903, und ein Prisma 905, um den Laser entlang der optischen Achse zu senkrechtem Einfall auf die Oberfläche einer Probe 908 umzulenken. Das Prisma 905 lenkt auch die spiegelnde Reflektion von Oberflächenstrukturen der Probe 908 aus dem Objektiv 906. Das Objektiv 906 sammelt von der Probe 908 gestreutes Licht und fokussiert es auf einen Sensor 909. Linsen für das Objektiv 906 können in der allgemeinen Form eines katadioptrischen Objektivs 912, einer fokussierenden Linsengruppe 913 und eines Tubuslinsenabschnitts 914 vorgesehen sein, welche optional eine Zoom-Fähigkeit beinhalten.

[0093] In einem Hellfeldmodus richtet das Breitbandbeleuchtungsmodul 920 Breitbandlicht auf Strahlteiler 910, der dieses Licht zur fokussierenden Linsengruppe 913 und zum katadioptrischen Objektiv 912 reflektiert. Das katadioptrische Objektiv 912 beleuchtet die Probe 908 mit dem Breitbandlicht. Licht, das von der Probe 908 reflektiert oder gestreut wird, wird von dem Objektiv 906 gesammelt und auf Sensor 909 fokussiert. Das Breitbandbeleuchtungsmodul 920 umfasst beispielsweise eine lasergepumpte Plasmalichtquelle oder eine Bogenlampe. Das Breitbandbeleuchtungsmodul 920 kann auch ein Autofokussystem beinhalten, um ein Signal bereitzustellen, um die Höhe der Probe 908 relativ zum katadioptrischen Objektiv 912 zu steuern.

[0094] US-Patent 7,345,825 mit dem Titel „Beam delivery system for laser dark-field illumination in a catadioptric optical system“ an Chuang et al., US-Patent 8,665,536 mit dem Titel „External beam delivery system for laser dark-field illumination in a catadioptric optical system“ an Armstrong, und US-Patent 8,896,917 mit dem Titel „External beam delivery system using catadioptric objective with aspheric surfaces“ an Armstrong, welche alle durch Verweis hierin aufgenommen werden, beschreiben System 900 in weiteren Details.

[0095] Fig. 10A zeigt eine Oberflächeninspektionsvorrichtung 1000, welche Beleuchtungssystem 1001 und Sammelsystem 1010 zur Inspektion von Bereichen der Oberfläche 1011 beinhaltet. Wie in Fig. 10A gezeigt richtet ein Lasersystem 1020 einen Lichtstrahl 1002 durch eine Linse 1003. In einer bevorzugten Ausführungsform beinhaltet das Lasersystem

1020 einen der oben beschriebenen 183-nm-Laser, einen getemperten Kristall und ein Gehäuse, um den getemperten Zustand des Kristalls während des Standardbetriebs aufrechtzuerhalten, indem es ihn vor Feuchtigkeit oder anderen Verunreinigungen aus der Umgebung schützt. Eine erste Strahlformungsoptik kann dazu ausgebildet sein, einen Strahl von dem Laser zu empfangen und den Strahl zu einem elliptischen Querschnitt bei einer Strahltaille in oder nahe dem Kristall zu fokussieren.

[0096] Die Linse 1003 ist so ausgerichtet, dass ihre Hauptebene im Wesentlichen parallel zu einer Probenoberfläche 1011 ist, und dass in Folge die Beleuchtungslinie 1005 auf der Oberfläche 1011 in der Fokusebene der Linse 1003 gebildet wird. Zusätzlich werden Lichtstrahl 1002 und fokussierter Strahl 1004 unter einem nicht-orthogonalen Einfallswinkel auf die Oberfläche 1011 gerichtet. Insbesondere können der Lichtstrahl 1002 und der fokussierte Strahl 1004 unter einem Winkel zwischen ungefähr 1 Grad und ungefähr 85 Grad zu einer Normalenrichtung auf die Oberfläche 1011 gerichtet werden. Auf diese Weise liegt die Beleuchtungslinie 1005 im Wesentlichen in der Einfallsebene des fokussierten Strahls 1004.

[0097] Sammelsystem 1010 beinhaltet Linse 1012, um von der Beleuchtungslinie 1005 gestreutes Licht zu sammeln, und Linse 1013, um das aus der Linse 1012 kommende Licht auf eine Einrichtung, etwa ein Charge-Coupled-Device (CCD) 1014, zu fokussieren, welche eine Anordnung lichtempfindlicher Detektoren umfasst. In einer Ausführungsform kann das CCD 1014 eine lineare Anordnung von Detektoren beinhalten. In solchen Fällen kann die lineare Anordnung von Detektoren innerhalb CCD 1014 parallel zu der Beleuchtungslinie 1015 ausgerichtet sein. In einer Ausführungsform kann CCD 1014 ein von Elektronen beschossenes CCD oder eine lineare Anordnung von Lawinen-Photodetektoren sein. In einer Ausführungsform können mehrere Sammelsysteme beinhalten sein, wobei jedes der Sammelsysteme ähnliche Komponenten beinhaltet, aber sich in der Orientierung unterscheidet.

[0098] Beispielsweise zeigt **Fig. 10B** eine beispielhafte Anordnung von Sammelsystemen 1031, 1032 und 1033 für eine Oberflächeninspektionsvorrichtung (wobei ihr Beleuchtungssystem, z.B. ähnlich zu dem des Beleuchtungssystems 1001, der Einfachheit halber nicht gezeigt ist). Eine erste Optik im Sammelsystem 1031 sammelt Licht, welches von der Oberfläche der Probe 1011 in eine erste Richtung gestreut wird. Eine zweite Optik im Sammelsystem 1032 sammelt Licht, welches von der Oberfläche der Probe 1011 in eine zweite Richtung gestreut wird. Eine dritte Optik im Sammelsystem 1033 sammelt Licht, welches von der Oberfläche der Probe 1011 in eine dritte Richtung gestreut wird. Man

beachte, dass der erste, zweite und dritte Pfad bei verschiedenen Einfallswinkeln zur Oberfläche der Probe 1011 verlaufen. Eine Plattform 1035, welche die Probe 1011 trägt, kann verwendet werden, um eine Relativbewegung zwischen der Optik und der Probe 1011 zu bewirken, so dass die gesamte Oberfläche der Probe 1011 abgerastert werden kann. Das am 28. April 2009 an Leong et al. ausgegebene US-Patent 7,525,649, welches hierin durch Verweis aufgenommen wird, beschreibt die Oberflächeninspektionsvorrichtung 1000 und andere mehrfache Sammelsysteme in weiteren Einzelheiten.

[0099] **Fig. 11** zeigt ein Oberflächeninspektionssystem 1100, welches zur Inspektion von Anomalien auf einer Oberfläche 1101 verwendet werden kann. In dieser Ausführungsform kann die Oberfläche 1101 durch einen im Wesentlichen stationären Beleuchtungseinrichtungsanteil eines Lasersystems 1130 beleuchtet werden, das einen der oben beschriebenen 183-nm-Laser umfasst. Der Ausgang des Lasersystems 1130 kann der Reihe nach durch Polarisationsoptik 1121, einen Strahlaufweiter und eine Blende 1122 und Strahlformungsoptik 1123 geleitet werden, um den Strahl aufzuweiten und zu fokussieren.

[0100] Der fokussierte Laserstrahl 1102 wird dann durch eine Strahlauffaltungskomponente 1103 und einen Strahlablenker 1104 reflektiert, um den Strahl 1105 zu Oberfläche 1101 zur Beleuchtung der Oberfläche zu leiten. In der bevorzugten Ausführungsform ist der Strahl 1105 im Wesentlichen normal oder senkrecht zur Oberfläche 1101, wenn auch der Strahl 1105 in anderen Ausführungsformen unter einem schiefen Winkel zur Oberfläche 1101 verlaufen kann.

[0101] In einer Ausführungsform läuft der Strahl 1105 im Wesentlichen senkrecht oder normal zur Oberfläche 1101 und der Strahldeflektor 1104 reflektiert die spiegelnde Reflektion des Strahls von der Oberfläche 1101 zu einer Strahlumlenkkomponente 1103 und wirkt dadurch als eine Abschirmung, um die spiegelnde Reflektion daran zu hindern, die Detektoren zu erreichen. Die Richtung der spiegelnden Reflektion ist entlang der Linie SR, welche normal zu der Oberfläche 1101 der Probe ist. In einer Ausführungsform, in der der Strahl 1105 normal zu der Oberfläche 1101 ist, fällt diese Linie SR mit der Richtung des Beleuchtungsstrahls 1105 zusammen, wobei diese gemeinsame Bezugslinie oder Richtung hierin als die Achse des Inspektionssystems 1100 bezeichnet wird. Wenn der Strahl 1105 unter einem schiefen Winkel zur Oberfläche 1101 verläuft, fällt die Richtung der spiegelnden Reflektion SR nicht mit der Einfallsrichtung des Strahls 1105 zusammen; in solch einem Fall wird die Linie SR, welche die Richtung der Oberflächennormale anzeigt, als die Hauptachse des Sammelabschnitts des Inspektionssystems 1100 bezeichnet.

[0102] Von kleinen Teilchen gestreutes Licht wird vom Spiegel 1106 gesammelt und zu Blende 1107 und Detektor 1108 gerichtet. Von großen Teilchen gestreutes Licht wird von Linsen 1109 gesammelt und zu Blende 1110 und Detektor 1111 gerichtet. Man beachte, dass einige große Teilchen Licht streuen, das ebenfalls gesammelt und zum Detektor 1108 gerichtet wird, aber solches Licht ist von relativ niedriger Intensität verglichen mit der Intensität gestreuten Lichts, zu dessen Detektion der jeweilige Detektor ausgebildet ist. In einer Ausführungsform kann der Detektor 1111 eine Anordnung lichtsensitiver Elemente beinhalten, wobei jedes licht-sensitive Element der Anordnung von lichtsensitiven Elementen dazu ausgebildet ist, einen entsprechenden Anteil eines vergrößerten Bildes der Beleuchtungslinie zu detektieren. In einer Ausführungsform kann das Inspektionssystem für die Verwendung bei der Detektion von Defekten auf unstrukturierten Wafern ausgebildet sein. Das US-Patent 6,271,916, welches am 07. August 2001 an Marx et al. ausgegeben wurde, und welches durch Verweis hierin aufgenommen wird, beschreibt das Inspektionssystem 1100 in weiteren Einzelheiten.

[0103] Fig. 12 zeigt ein Inspektionssystem 1200, das dazu ausgebildet ist, Anomaliedetektion unter Verwendung sowohl normaler als auch schiefer Beleuchtungsstrahlen zu implementieren. In dieser Konfiguration kann ein Lasersystem 1230, welches einen der hierin beschriebenen 183-nm-Laser beinhaltet, einen Laserstrahl 1201 bereitstellen. Eine Linse 1202 fokussiert den Strahl 1201 durch einen räumlichen Filter 1203, und Linse 1204 kollimiert den Strahl und lenkt ihn zu einem polarisierenden Strahlteiler 1205. Der Strahlteiler 1205 leitet eine erste polarisierte Komponente zu dem normalen Beleuchtungskanal und eine zweite polarisierte Komponente zu dem schiefen Beleuchtungskanal, wobei die erste und zweite Komponente orthogonal sind. In dem normalen Beleuchtungskanal 1206 wird die erste polarisierte Komponente durch Optik 1207 fokussiert und vom Spiegel 1208 zu einer Oberfläche einer Probe 1209 reflektiert. Die von der Probe 1209 gestreute Strahlung wird von einem Parabolspiegel 1210 gesammelt und zu einem Detektor oder einer Photomultiplier-Röhre 1211 fokussiert.

[0104] In dem schiefen Beleuchtungskanal 1212 wird die zweite polarisierte Komponente durch den Strahlteiler 1205 zu einem Spiegel 1213 reflektiert, der solch einen Strahl durch ein $\lambda/2$ -Plättchen 1214 reflektiert, und durch Optik 1215 zur Probe 1209 fokussiert. Strahlung aus dem schiefen Beleuchtungsstrahl in dem schiefen Kanal 1212, die durch Probe 1209 gestreut wird, wird von Parabolspiegel 1210 gesammelt und zu Detektor oder Photomultiplier-Röhre 1211 fokussiert. Der Detektor oder die Photomultiplier-Röhre 1211 hat einen Lochblenden- oder Schlitzzugang. Die Lochblende oder der Schlitz

und der beleuchtete Fleck (von dem normalen und dem schiefen Beleuchtungskanal auf der Oberfläche 1209) sind vorzugsweise bei den Foki des Parabolspiegels 1210.

[0105] Der Parabolspiegel 1210 sammelt die gestreute Strahlung von der Probe 1209 in einen kollimierten Strahl 1216. Der kollimierte Strahl 1216 wird dann durch ein Objektiv 1217 und durch einen Analysator 1218 hindurch zu der Photomultiplier-Röhre 1211 fokussiert. Man beachte, dass auch gekrümmte verspiegelte Flächen mit anderen Formen als paraboloiden Formen ebenfalls verwendet werden können. Ein Instrument 1220 kann für Relativbewegung zwischen den Strahlen und der Probe 1209 sorgen, so dass Flecken über die Oberfläche der Probe 1209 gerastert werden. US-Patent 6,201,601, ausgegeben an Vaez-Iravani et al. am 31. März 2001 und hierin durch Verweis aufgenommen, beschreibt das Inspektionssystem 1200 in weiteren Einzelheiten.

[0106] Fig. 13 zeigt einen beispielhaften Pulsvervielfacher 1300 zur Verwendung mit dem oben beschriebenen 183-nm-Laser in einem Inspektions- oder Metrologiesystem, etwa einem der oben beschriebenen Inspektionssysteme. Der Pulsvervielfacher 1300 ist dazu ausgebildet, Pulszüge aus jedem Eingangspuls 1301 von einem 183-nm-Laser (nicht gezeigt) zu erzeugen. Der Eingangspuls 1301 trifft auf einen Strahlteiler 1307. Ein Teil eines jeden Pulses wird von einem Strahlteiler 1307 in einer Ausgangsrichtung 1302 transmittiert und ein Teil tritt in eine Ringkavität ein. Wie in der US-Patentanmeldung 13/711,593 (hierin die '593-Anmeldung) mit dem Titel „Semiconductor inspection and metrology system using laser pulse multiplier“, eingereicht durch Chuang et al. am 11. Dezember 2012 und hierin durch Verweis aufgenommen, erklärt, sollte der Strahlteiler 1307, wenn er als Pulsratenverdoppler verwendet wird, falls die Ringkavität und der Strahlteiler 1307 verlustlos wären, vorzugsweise ungefähr ein Drittel der Energie eines jeden Laserpulses transmittieren und ungefähr zwei Drittel in die Ringkavität reflektieren. Wie in der '593-Anmeldung erklärt, können diese Transmissions- und Reflektionswerte modifiziert werden, um Verlusten des Strahlteilers und der Kavität Rechnung zu tragen, um Ausgangspulse im Wesentlichen gleicher Energie in einem Pulsratenverdoppler beizubehalten.

[0107] Nachdem ein Laserpuls in die Ringkavität eintritt, wird er von einem gekrümmten Spiegel 1305 reflektiert und zu einem gekrümmten Spiegel 1306 gerichtet. Der Spiegel 1306 richtet das Licht zurück zum Spiegel 1305. Nach mehreren Reflektionen von beiden Spiegeln (zwei Reflektionen von jedem Spiegel in dem in Fig. 13 gezeigten Beispiel) läuft der Puls durch Ausgleichsplatte 1308 und gelangt zum Strahlteiler 1307 zurück. Die Ausgleichsplatte 1308 soll den Versatz der Laserpulse

beim Durchlaufen des Strahlteilers 1307 innerhalb der Ringkavität ausgleichen. Vorzugsweise hat die Ausgleichsplatte 1308 im Wesentlichen die gleiche Dicke und den gleichen Brechungsindex wie der Strahlteiler 1307. Wird die Ausgleichsplatte 1308 in denselben Teil des Lichtwegs in der Ringkavität gesetzt wie der Strahlteiler 1307 (wie gezeigt), sollte die Ausgleichsplatte 1308 vorzugsweise unter einem gleichen Winkel, aber in entgegengesetzter Richtung, relativ zu dem Lichtweg orientiert sein, wie der Strahlteiler 1307. Alternativ kann die Ausgleichsplatte 1308 in einen anderen Teil der Ringkavität mit geeigneter Orientierung gesetzt werden.

[0108] Wie in der '593-Anmeldung erklärt, ist die Ringkavität ohne Strahlteiler 1307 und Ausgleichsplatte 1308 den Ringkavitäten ähnlich, die in Herriott et al., „Off-axis Spherical Mirror Interferometers“, Applied Optics 3, #4, Seiten 523-526 (1964) und in Herriott et al., „Folded Optical Delay Lines“, Applied Optics 4, #8, Seiten 883-889 (1965) beschrieben sind. Wie in diesen Verweisen beschrieben, hängt die Anzahl der Reflektionen von jedem Spiegel nur vom Radius der Krümmung der beiden Spiegel relativ zum Abstand der Spiegel d ab, und hängt nicht vom genauen Winkel ab, unter dem das Licht in die Ringkavität eintritt. Beträgt der Krümmungsradius der beiden Spiegel beispielsweise d (d.h. die Brennweite jedes Spiegels ist $d/2$), so ist jeder Puls nach zwei Reflektionen von jedem Spiegel refokussiert worden und gelangt zurück zu seinem Ausgangspunkt (Strahlteiler 1307 in Fig. 13). Herriott et al. (1964) nennen Werte für die Brennweite der Spiegel (und damit den Krümmungsradius) als ein Vielfaches von d für 2, 3, 4, 6, 12 und 24 Reflektionen von jedem Spiegel. Wie in Herriott et al. (1964) erklärt, sind andere Anzahlen von Reflektionen möglich. Wie in Herriott et al. (1964) beschrieben, brauchen die Reflektionen nicht in einer Ebene zu liegen, abhängig von der Anzahl der Reflektionen und dem Winkel, unter dem das Licht von dem Strahlteiler 1307 auf den Spiegel 1305 einfällt. Mehr als zwei Reflektionen von jedem Spiegel machen die Kavität kompakter im Vergleich zu einer Kavität, welche zwei Reflektionen von jedem Spiegel benutzt. Da jedoch bei jeder Reflektion an einem Spiegel etwas Licht verloren geht, sind zwei Reflektionen pro Spiegel bevorzugt, wenn die Verluste bei Reflektion an einem Spiegel nicht so klein sind (wie beispielsweise bei Wellenlängen im tiefen UV), aber mehr als zwei Reflektionen pro Spiegel können verwendbar sein, wenn die Verluste pro Reflektion klein sind (z.B. bei Wellenlängen im Infraroten, im sichtbaren Bereich oder im nahen UV). Man beachte, dass die Länge der Ringkavität und damit die Fokussierung der Ringkavität, durch Einstellung des Abstands d eingestellt werden kann.

[0109] Wenn ein Laserpuls nach Durchlaufen der Kavität wieder am Strahlteiler 1307 ankommt, wird ein Teil des Pulses aus der Ringkavität heraus in

die Richtung 1302 reflektiert, und ein Teil wird zurück in die Ringkavität transmittiert. Der Pulsvervielfacher 1300 refokussiert die Laserpulse unabhängig von der Position der Strahltaile der Eingangslaserpulse, so dass die Ausgangspulse in Richtung 1302 ungefähr oder im Wesentlichen ähnliche Divergenz und Strahltaillenposition wie die Eingangspulse zu haben scheinen. In einigen bevorzugten Ausführungsformen des Pulsvervielfachers 1300 sind die Eingangslaserpulse aus der Richtung 1301 deutlich kollimiert, um die auf den Strahlteiler 1307 einfallende Leistungsdichte zu minimieren. Die Ausgangslaserpulse sind dann ebenfalls deutlich kollimiert.

[0110] Periodisch wird ein neuer Eingangspuls 1301 durch den Laser an den Pulsvervielfacher 1300 geliefert. In einer Ausführungsform kann der Laser ungefähr 0,015 Nanosekunden (ns) Laserpulse bei einer Wiederholungsrate von ungefähr 80 MHz erzeugen, und die Kavität kann die Wiederholungsrate verdoppeln. Man beachte, dass die optische Weglänge der Ringkavität, und damit die Verzögerung der Ringkavität, durch die Auswahl des Abstands d und des Krümmungsradius für die Spiegel 1305 und 1306 gesteuert werden kann, welche die Anzahl der Reflektionen steuert und zugleich eine Refokussierung der Laserpulse sicherstellt.

[0111] Die optische Weglänge der Ringkavität kann etwas größer oder etwas kleiner sein als die nominale Länge, die direkt aus dem Pulsintervall dividiert durch den Multiplikationsfaktor berechnet wird. Dies führt dazu, dass die Pulse nicht alle exakt zur gleichen Zeit am polarisierten Strahlteiler eintreffen, und so der Ausgangspuls leicht verbreitert wird. Beträgt die Eingangspulswiederholungsrate beispielsweise 80 MHz, so wäre die Kavitätsverzögerung nominal 6,25 ns für eine Frequenzmultiplikation um 2. In einer Ausführungsform kann eine Kavitätslänge verwendet werden, die einer Verzögerung von 6,27 ns entspricht, so dass die mehrfach reflektierten Pulse nicht exakt zur gleichen Zeit eintreffen wie ein einfallender Puls. Ferner kann eine Kavitätslänge von 6,27 ns für eine Eingangspulswiederholungsrate von 80 MHz den Puls auch vorteilhaft verbreitern und die Pulshöhe reduzieren. Andere Pulsvervielfacher mit anderen Eingangspulsraten oder anderen Multiplikationsfaktoren können andere Kavitätsverzögerungen haben.

[0112] Mehr Einzelheiten zu Pulsmultiplikation und alternativen Pulsvervielfachern, die für die Verwendung mit einem 183-nm-Laser in Inspektions- und Metrologiesystemen geeignet sind, finden sich in der oben genannten '593-Anmeldung, in der US-Patentanmeldung 13/487,075 mit dem Titel „Semiconductor Inspection and Metrology System Using Laser Pulse Multiplier“, eingereicht am 01. Juni 2012 durch Chuang et al., und in der US-Patentanmeldung 14/596,738 mit dem Titel „Laser Pulse Mul-

tiplication Using Prisms“ eingereicht am 14. Januar 2015 durch Chuang et al. All diese Anmeldungen werden durch Verweis hierin aufgenommen.

[0113] Zusätzlich zu den oben dargestellten Lösungen, die 183-nm-Laserausgangslicht über die Erzeugung frequenzkonvertierter Signale unter Verwendung von Basislicht erzeugen, ist es auch möglich, geeignete frequenzkonvertierte Signale durch Frequenzkonversion von Licht der zweiten Harmonischen zu erzeugen. Beispielsweise zeigt **Fig. 14** eine Laseranordnung 1400, welche einige der gleichen Komponenten beinhaltet, die in den Ausführungsformen der **Fig. 1A** und **1B** verwendet werden und die daher mit den gleichen Bezugsziffern bezeichnet werden. Insbesondere beinhaltet die Laseranordnung 1400 einen Basislaser 102, dazu ausgebildet, Basislicht 128 mit einer Basiswellenlänge ω zu erzeugen, und verwendet einen Strahlteiler 120, um das Basislicht 128 in Anteile 127 und 130 aufzuteilen, wobei der Anteil 130 zu einem Erzeuger einer fünften Harmonischen 157 gerichtet wird. Man beachte, dass alternativ der Anteil 130 der Basis, der zum Erzeuger einer fünften Harmonischen gerichtet wird, aus unverbrauchter Basis aus der Ausgabe des Moduls zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 genommen werden kann, in ähnlicher Weise wie in **Fig. 1B** gezeigt. Zusätzlich, ähnlich zu der in **Fig. 1B** gezeigten Herangehensweise, beinhaltet die Laseranordnung 1400 ein Modul zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 und ein Modul zur Erzeugung einer vierten Harmonischen 155, welche Licht der zweiten Harmonischen 175 und Licht der vierten Harmonischen 162 erzeugen, welches zum Modul zur Erzeugung einer fünften Harmonischen 157 transmittiert wird. Schließlich beinhaltet die Laseranordnung 1400 ein OPS 116C, das ein frequenzkonvertiertes Signal 129 bei einer herabgesetzten Frequenz ω_s erzeugt, so dass, wenn das frequenzkonvertierte Signal 129 daraufhin mit Licht der fünften Harmonischen 134 in einem Frequenzmischungsmodul 104 gemischt wird, Laserausgangslicht 140 in dem Bereich von ungefähr 180 nm und ungefähr 185 nm erzeugt wird.

[0114] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform unterscheidet sich die Laseranordnung 1400 von den Ausführungsformen der **Fig. 1A** und **1B** darin, dass das OPS 116C einen „grün-gepumpten“ Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO) 117C beinhaltet, der einen Anteil von Licht einer zweiten Harmonischen 177 empfängt und frequenzkonvertiert, welcher aus dem Ausgang des Moduls zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen 153 durch einen Strahlteiler 174 abgetrennt wird. Bei den verschiedenen oben erwähnten Frequenzen der gebräuchlichen Basislaser (d.h. mit entsprechenden Wellenlängen im Bereich von 1030 nm bis 1064 nm) hat eine Frequenz einer zweiten Harmonischen 2ω des Anteils von Licht der zweiten Harmonischen

177 entsprechende Wellenlängen im Bereich von 515 nm bis 532 nm, was sich innerhalb des Bereichs befindet, der normalerweise mit sichtbarem grünem Licht (d.h. 495 bis 570 nm) in Verbindung gebracht wird. Somit ist der OPO 117C „grün-gepumpt“, in dem Sinn, dass sein Eingang Licht im sichtbaren grünen Spektrum ist. Wie in dem gestrichelten Kasten im unteren linken Bereich der **Fig. 14** angegeben, ist OPO 117C ansonsten in einer zu OPO 117E (oben diskutiert) ähnlichen Weise konstruiert und konfiguriert, um den Anteil von Licht der zweiten Harmonischen 177 zu einer geeigneten herabgesetzten Signalfrequenz (z.B. 532 nm zu ungefähr $1,3 \mu\text{m}$) frequenzkonvertieren. Das heißt, abgesehen vom nichtlinearen Kristall 633C (unten diskutiert) sind die optischen Komponenten, die die vom OPO 117C verwendete einfach-resonante Dauerstrich-OPO-Anordnung bilden, im Wesentlichen ähnlich zu den oben mit Bezug auf OPO 117E beschriebenen, und daher wird der Kürze halber ihre Beschreibung hier nicht wiederholt. Ein Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass kein Leitsignal niedriger Leistung erforderlich ist (weil die Frequenzkonversion des 532 nm Lichts keine Frequenzen erzeugt, die von den meisten nichtlinearen Kristallen absorbiert werden), was OPS 116C insofern vereinfacht, dass die Erzeugung des frequenzkonvertierten Signals 129 durch Verwendung lediglich eines OPO und eines optionalen Strahlteilers 642C erreicht wird, der verwendet werden kann, um unerwünschte Frequenzen aus dem frequenzkonvertierten Signal 129 zu entfernen (wie in **Fig. 14** gezeigt).

[0115] Auch wenn der Ansatz mit einem grün-gepumpten OPO, der in der Laseranordnung 1400 verwendet wird, verwendet wurde, um erfolgreich ein frequenzkonvertiertes Signal 129 bei herabgesetzten Frequenzen ω_s (z.B. $1,3 \mu\text{m}$) zu erzeugen, das erforderlich ist, um unter Verwendung des grün-gepumpten OPO 117C 183-nm-Laserausgangslicht zu erzeugen, schränkt die Verwendung des (grünen) Lichts der zweiten Harmonischen zur Erzeugung des frequenzkonvertierten Signals 129 die Art des nichtlinearen Kristalls ein, der im OPO 117C verwendet werden kann, und die Konversion von grünem Licht ist weniger effizient als die Konversion niedrigerer Basisfrequenzen. Das heißt, bei hohen Leistungsniveaus werden viele der bevorzugten bei höheren Frequenzen (z.B. OPO 117E; siehe **Fig. 6B**) eingesetzten nichtlinearen Kristalle (z.B. PPSLT) durch zwei-Photonen-Absorption von Licht im sichtbaren grünen Spektrum (z.B. 532 nm) beschädigt. Um dem zu begegnen implementiert der grün-gepumpte OPO 117C den nichtlinearen Kristall 633C vorzugsweise unter Verwendung eines Lithiumtriborat-(LBO)-Kristalls, da LBO-Kristalle eine größere Bandlücke als Lithiumniobat oder SLT haben, und daher durch hohe Leistung bei Frequenzen grünen Lichts keinen Schaden erleiden. Jedoch erzeugt, selbst wenn ein LBO-Kristall (oder ein anderer grünlichtto-

leranter Kristall) im OPO 117C verwendet wird, die Frequenzkonversion von grünem Licht ein unerwünschtes ungefähr 900 nm Photon für jedes 1,3 µm Photon, so dass mehr als die Hälfte der Leistung, die in den OPO 117C geht, verloren ist, was die Laseranordnung 1400 weniger effizient macht als die Laseranordnungen 100A und 100B (oben beschrieben).

[0116] Gemäß noch einer anderen möglichen Ausführungsform könnte eine Laseranordnung ähnlich der in **Fig. 1A** gezeigten hergestellt werden, in der OPS 116 durch einen gewöhnlichen OPO ersetzt wird, der einen Lithium-Indium-Selenid-(LISE)-Kristall verwendet. Die Erfinder sind der Ansicht, dass dieser Ansatz funktionieren sollte, da man annimmt, dass LISE-Kristalle Frequenzen um 6 µm nicht stark absorbieren, und daher in Folge von Erwärmung nicht nennenswert verzerrt oder beschädigt werden sollten. Jedoch sind LISE-Kristalle neu, und die Verfügbarkeit von LISE-Kristallen hinreichend hoher Qualität ist gegenwärtig unbestimmbar.

[0117] Der hierin beschriebene 183-nm-Laser kann in einem Inspektions- oder Metrologiesystem in Verbindung mit Optiken verwendet werden, die die Pulse formen, Kohärenz reduzieren oder Speckles reduzieren. Weitere Einzelheiten zu pulsformenden, Kohärenz und Speckle reduzierenden Vorrichtungen und Verfahren werden im US-Patent 9,080,990, ausgegeben am 14. Juli 2015, und im US-Patent 9,080,991, ebenfalls ausgegeben am 14. Juli 2015, offenbart. Diese beiden Patente werden durch Verweis herein aufgenommen.

[0118] Die verschiedenen Ausführungsformen der hierin beschriebenen Strukturen und Verfahren erläutern lediglich die Prinzipien der Offenbarung und sind nicht dazu gedacht, den Umfang der Offenbarung auf die speziellen beschriebenen Ausführungsformen zu beschränken. Beispielsweise können andere nichtlineare Kristalle als CLBO, LBO oder BBO oder periodisch gepolte Materialien für einige der Stufen der Frequenzkonversion, der Erzeugung von Harmonischen und des Mischens verwendet werden.

Patentansprüche

1. Eine Laseranordnung (100A) zur Erzeugung von Laserausgangslicht (140A) mit einer Ausgangswellenlänge im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm, wobei die Laseranordnung (100A) umfasst:
einen Basislaser (102), dazu ausgebildet, Basislicht (128) zu erzeugen, das eine Basisfrequenz hat;
ein Optisch-Parametrisches-System (OPS) (116), das mit dem Basislaser (102) gekoppelt ist, so dass das OPS (116) einen ersten Teil (127) des Basislichts (128) empfängt, und wobei das OPS

(116) dazu ausgebildet ist, ein frequenzkonvertiertes Signal (129) mit einer herabgesetzten Frequenz, welche geringer als die Basisfrequenz ist, zu erzeugen;

einen Erzeuger einer fünften Harmonischen (103), der mit dem Basislaser (102) verbunden ist, so dass der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) einen zweiten Teil (130) des Basislichts (128) empfängt, und wobei der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) dazu ausgebildet ist, Licht der fünften Harmonischen (134) zu erzeugen, welches eine Frequenz der fünften Harmonischen hat, welche dem Fünffachen der Basisfrequenz entspricht; und

ein Frequenzmischungsmodul (104), das optisch gekoppelt ist, um das frequenzkonvertierte Signal (129) von dem OPS (116) und das Licht der fünften Harmonischen (134) von dem Erzeuger der fünften Harmonischen (103) zu empfangen, und dazu ausgebildet ist, das Laserausgangslicht (140A) zu erzeugen, indem das frequenzkonvertierte Signal (129) und das Licht der fünften Harmonischen (134) gemischt werden,

wobei das OPS (116) umfasst:

einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (117), dazu ausgebildet, ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (118) zu erzeugen, welches die herabgesetzte Frequenz und ein erstes Leistungsniveau hat; und

einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (optical parametric amplifier, OPA) (119), derart ausgebildet, dass das frequenzkonvertierte Leitsignal (118) und ein Teil (127) des Basislichts (128) durch einmaliges Durchlaufen eines nichtlinearen Kristalls (607) gemischt werden, wobei der nichtlineare Kristall (607) so ausgebildet ist, dass das Mischen das frequenzkonvertierte Signal bei einem zweiten Leistungsniveau erzeugt, welches größer als das Zehnfache des ersten Leistungsniveaus ist, und wobei das OPS (116) so ausgebildet ist, dass eine Summe der herabgesetzten Frequenz und der Frequenz der fünften Harmonischen das Laserausgangslicht (140A) in dem Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm erzeugt,

wobei das OPS (116) ferner einen Strahlteiler (631) umfasst, der dazu ausgebildet ist, den ersten Teil (127) des Basislichts (128) in einen ersten Unter-Teil (127A) und einen zweiten Unter-Teil (127B) aufzuteilen, wobei der Erzeuger für das frequenzkonvertierte Leitsignal einen Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO) (117E) umfasst, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118E) durch Frequenzkonversion des ersten Unter-Teils (127A) zu erzeugen; und wobei der OPA (119E) dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118E) mit dem zweiten Unter-Teil (127B) zu mischen.

2. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 1, wobei der Basislaser (102) dazu ausgebildet ist, das

Basislicht (128) bei der Basisfrequenz zu erzeugen, der eine der folgenden Wellenlängen entspricht: ungefähr 1064 nm, ungefähr 1053 nm, ungefähr 1047 nm und ungefähr 1030 nm.

3. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 1, wobei mindestens entweder der Erzeuger der fünften Harmonischen (103) oder das Frequenzmischungsmodul (104) einen der folgenden Kristalle umfasst: einen getemperten CLBO-Kristall, einen mit Deuterium behandelten CLBO-Kristall, einen mit Wasserstoff behandelten CLBO-Kristall.

4. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 1, wobei das frequenzkonvertierte Signal (129) eine frequenzkonvertierte Wellenlänge hat, welche der herabgesetzten Frequenz entspricht, wobei der OPO (117E) einen ersten Fokussierspiegel (632), einen nichtlinearen Kristall (633), einen zweiten Fokussierspiegel (634), einen Wellenlängenselektor (637) und einen Auskoppler (636) umfasst, welche funktionell ausgebildet sind um eine Kavität zu bilden, in der Licht zwischen dem Wellenlängenselektor (637) und dem Auskoppler (636) über den ersten (632) und den zweiten Fokussierspiegel (634) und den nichtlinearen Kristall (633) reflektiert wird, wobei der Wellenlängenselektor (637) dazu ausgebildet ist, für Licht mit Wellenlängen in einem Wellenlängenbereich von ungefähr 0,2 nm zentriert auf der frequenzkonvertierten Wellenlänge hoch reflektierend zu sein, und wobei der Auskoppler (636) dazu ausgebildet ist, einen Teil des zwischen dem Wellenlängenselektor und dem Auskoppler reflektierten Lichts als frequenzkonvertiertes Leitsignal durchzulassen.

5. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 4, wobei das OPS (116) umfasst: einen Strahlkombinierer (640), dazu ausgebildet, den zweiten Unter-Teil (127B) mit dem frequenzkonvertierten Leitsignal (118E) zu kombinieren; und einen nichtlinearen Kristall (641), dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118E) durch stimulierte Frequenzkonversion des zweiten Unter-Teils (127B) zu verstärken, wobei eine optische Weglänge vom Strahlteiler (631) zu dem Strahlkombinierer (640) so eingestellt ist, dass Pulse des zweiten Unter-Teils (127B) im Wesentlichen zur gleichen Zeit beim Strahlkombinierer (640) eintreffen wie Pulse des frequenzkonvertierten Leitsignals (118E).

6. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 1, wobei das Optisch-Parametrische-System (116) so ausgebildet ist, dass das frequenzkonvertierte Signal (129) eine Signalwellenlänge im Bereich von ungefähr 1250 nm bis ungefähr 1830 nm hat.

7. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 6, wobei der Basislaser (102) so ausgebildet ist, dass die Basisfrequenz eine entsprechende Wellenlänge

von ungefähr 1064,4 nm hat, und wobei das Optisch-Parametrische-System (116) so ausgebildet ist, dass das frequenzkonvertierte Signal (129) eine Signalwellenlänge im Bereich von ungefähr 1250 nm bis ungefähr 1420 nm hat.

8. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 6, wobei der Basislaser (102) so ausgebildet ist, dass die Basisfrequenz eine korrespondierende Wellenlänge von ungefähr 1030 nm hat, und wobei das Optisch-Parametrische-System (116) so ausgebildet ist, dass das frequenzkonvertierte Signal eine Signalwellenlänge im Bereich von ungefähr 1400 nm bis ungefähr 1830 nm hat.

9. Die Laseranordnung (100A) nach Anspruch 6, wobei der Basislaser (102) einen der folgenden umfasst: einen modengekoppelten Laser, einen Quasi-Dauerstrichlaser, eine Laserdiode und einen Faserlaser.

10. Ein Inspektionssystem (700) umfassend: eine Laseranordnung (100A), dazu ausgebildet, Laserausgangslicht (140A) mit einer Ausgangswellenlänge im Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm zu erzeugen; eine erste Optik (715, 720), dazu ausgebildet, das Laserausgangslicht (140A) von der Laseranordnung (100A) zu einem inspizierten Objekt (730) zu leiten; eine zweite Optik (740), dazu ausgebildet, einen Bildanteil des Laserausgangslichts zu sammeln, der von dem inspizierten Objekt beeinflusst wurde, und den Bildanteil zu einem oder mehreren Sensoren (770) zu leiten, wobei die Laseranordnung (100A) umfasst: einen Basislaser (102), dazu ausgebildet, Basislicht (128) zu erzeugen, das eine Basisfrequenz hat; ein Optisch-Parametrisches-System (OPS) (116), das mit dem Basislaser (102) gekoppelt ist, so dass das OPS (116) einen ersten Teil (127) des Basislichts (128) empfängt, und wobei das OPS (116) dazu ausgebildet ist, ein frequenzkonvertiertes Signal (129) mit einer herabgesetzten Frequenz, welche geringer als die Basisfrequenz ist, zu erzeugen; einen Erzeuger einer fünften Harmonischen (103), der mit dem Basislaser (102) verbunden ist, so dass der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) einen zweiten Teil (130) des Basislichts (128) empfängt, und wobei der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) dazu ausgebildet ist, Licht der fünften Harmonischen (134) zu erzeugen, welches eine Frequenz der fünften Harmonischen hat, welche dem Fünffachen der Basisfrequenz entspricht; und ein Frequenzmischungsmodul (104), das optisch gekoppelt ist, um das frequenzkonvertierte Signal (129) von dem OPS (116) und das Licht der fünften Harmonischen (134) von dem Erzeuger der fünften Harmonischen (103) zu empfangen, und dazu aus-

gebildet ist, das Laserausgangslicht (140A) zu erzeugen, indem das frequenzkonvertierte Signal (129) und das Licht der fünften Harmonischen (134) gemischt werden, wobei das OPS (116) umfasst:

einen Erzeuger für ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (117), dazu ausgebildet, ein frequenzkonvertiertes Leitsignal (118) zu erzeugen, welches die herabgesetzte Frequenz und ein erstes Leistungsniveau hat; und

einen Optisch-Parametrischen-Verstärker (OPA) (119), dazu ausgebildet, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118) mit einem Teil (127) des Basislichts (128) so zu mischen, dass das Mischen das frequenzkonvertierte Signal bei einem zweiten Leistungsniveau erzeugt, welches größer als das Zehnfache des ersten Leistungsniveaus ist, und wobei das OPS (116) so ausgebildet ist, dass eine Summe der herabgesetzten Frequenz und der Frequenz der fünften Harmonischen das Laserausgangslicht (140A) in dem Bereich von ungefähr 180 nm bis ungefähr 185 nm erzeugt, wobei das OPS (116) ferner einen Strahlteiler (631) umfasst, der dazu ausgebildet ist, den ersten Teil (127) des Basislichts (128) in einen ersten Unter-Teil (127A) und einen zweiten Unter-Teil (127B) aufzuteilen, wobei der Erzeuger für das frequenzkonvertierte Leitsignal einen Optisch-Parametrischen-Oszillator (OPO) (117E) umfasst, der dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118E) durch Frequenzkonversion des ersten Unter-Teils (127A) zu erzeugen; und wobei der OPA (119E) dazu ausgebildet ist, das frequenzkonvertierte Leitsignal (118E) mit dem zweiten Unter-Teil (127B) zu mischen.

11. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, wobei das Inspektionssystem (700) ein Dunkel-feldinspektionssystem umfasst.

12. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, welches ferner mindestens entweder einen akustooptischen Modulator oder einen elektrooptischen Modulator umfasst, der dazu ausgebildet ist, die Kohärenz des auf das inspizierte Objekt (730) gerichteten Laserausgangslichts (140A) zu reduzieren.

13. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, ferner einen Pulsratenvervielfacher (1300) umfassend, der dazu ausgebildet ist, eine Pulswiederholungsrate der Laseranordnung (100A) zu erhöhen.

14. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, wobei die zweite Optik (740) dazu ausgebildet ist, gleichzeitig einen reflektierten Bildanteil und einen transmittierten Bildanteil zu einem einzigen Sensor (770) zu richten.

15. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, wobei die erste Optik (715, 720) eine oder mehrere Komponenten umfasst, die dazu ausgebildet sind, das Laserausgangslicht (140A) so zu leiten, dass das Laserausgangslicht (140A) eine beleuchtete Linie auf dem inspizierten Objekt (730) bildet.

16. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, wobei die erste Optik (715, 720) eine oder mehrere Komponenten umfasst, die dazu ausgebildet sind, das Laserausgangslicht (140A) so zu leiten, dass das Laserausgangslicht (140A) auf dem inspizierten Objekt (730) mehrere gleichzeitig beleuchtete Flecken bildet.

17. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 10, wobei das Optisch-Parametrische-System (116) so ausgebildet ist, dass das frequenzkonvertierte Signal (129) eine Signalwellenlänge im Bereich von ungefähr 1250 nm bis ungefähr 1830 nm hat.

18. Das Inspektionssystem (700) nach Anspruch 17, wobei der Erzeuger einer fünften Harmonischen (103) zumindest einen der folgenden Kristalle umfasst:

einen getemperten CLBO-Kristall, einen mit Deuterium behandelten CLBO-Kristall, einen mit Wasserstoff behandelten CLBO-Kristall.

Es folgen 16 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

183-nm-Laser 100A

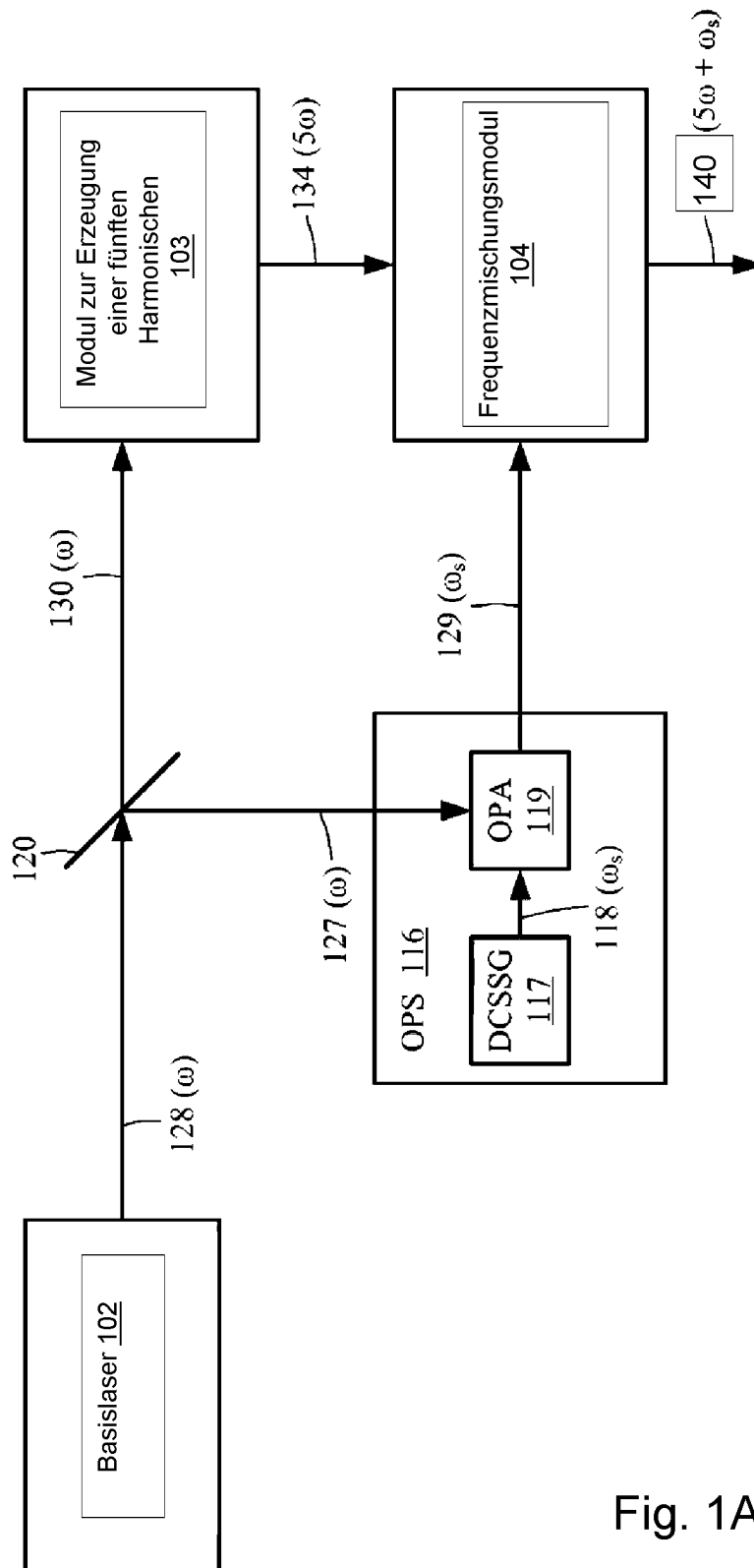


Fig. 1A

ERSATZBLATT

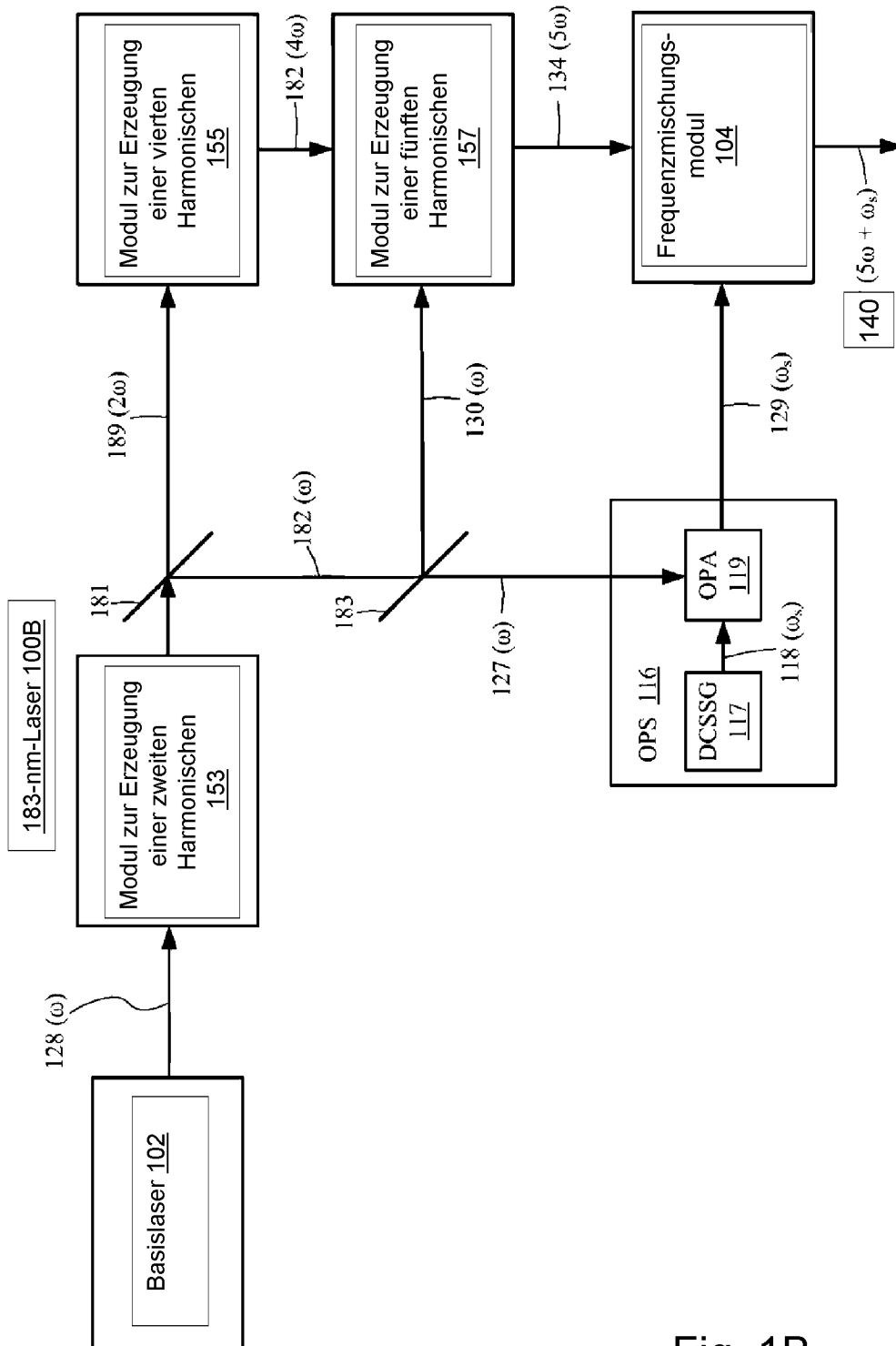


Fig. 1B

ERSATZBLATT

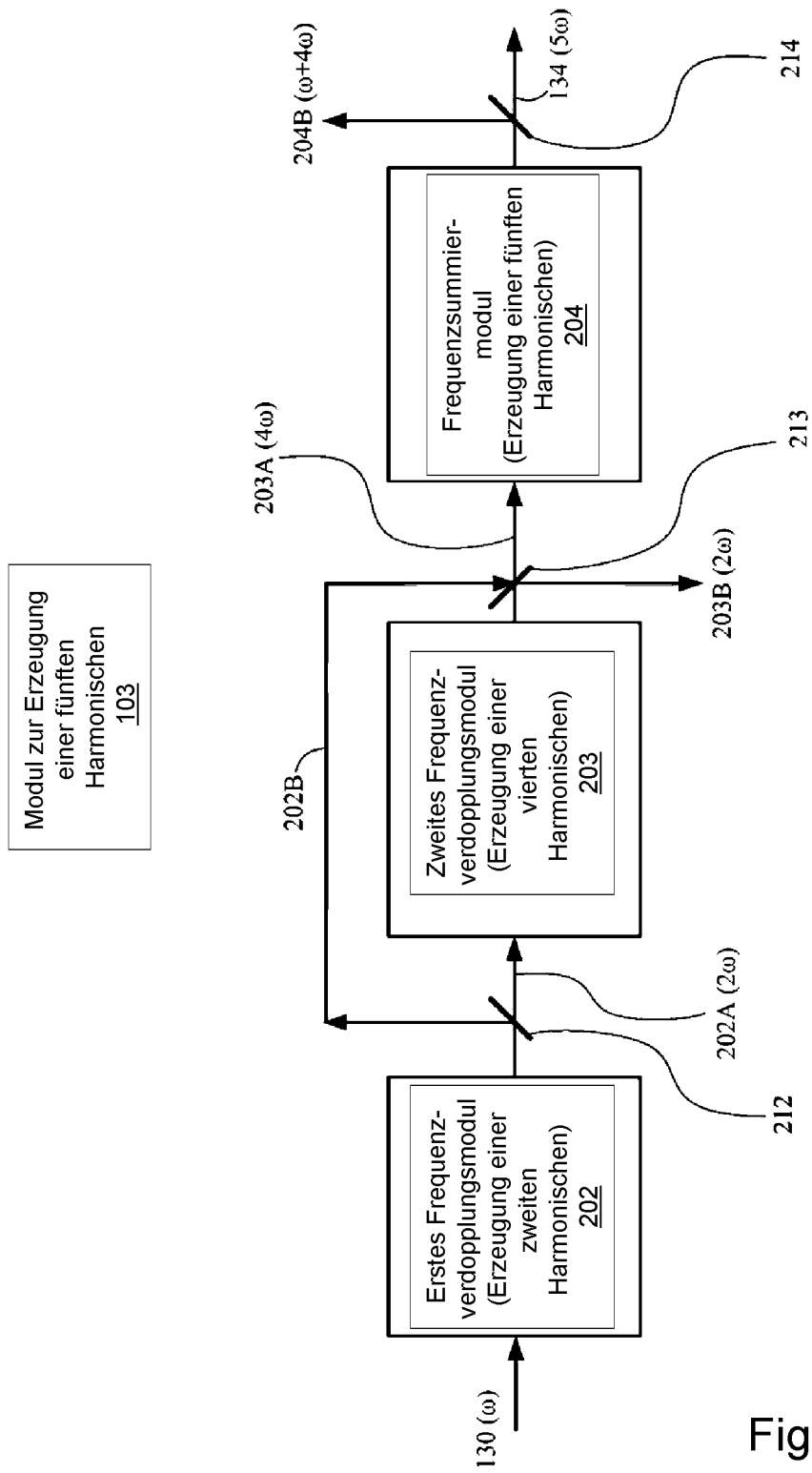


Fig. 2

| Basislaser- typ | Nd:Vanadat, Nd:YAG, Yb-dotierte Faser | | Yb-dotierte Faser | |
|----------------------|--|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Basis (kurz) | Basis (lang) | Basis (kurz) | Basis (lang) |
| ω | 1064.0 | 1065.0 | 1029.0 | 1031.0 |
| ω_s | 1307 | 1299 | 1652 | 1626 |
| 2ω | 532.0 | 532.5 | 514.5 | 515.5 |
| 4ω | 266.0 | 226.3 | 257.3 | 257.8 |
| 5ω | 212.8 | 213 | 205.8 | 206.2 |
| $5\omega + \omega_s$ | 183 | 183 | 183 | 183 |

Fig. 3

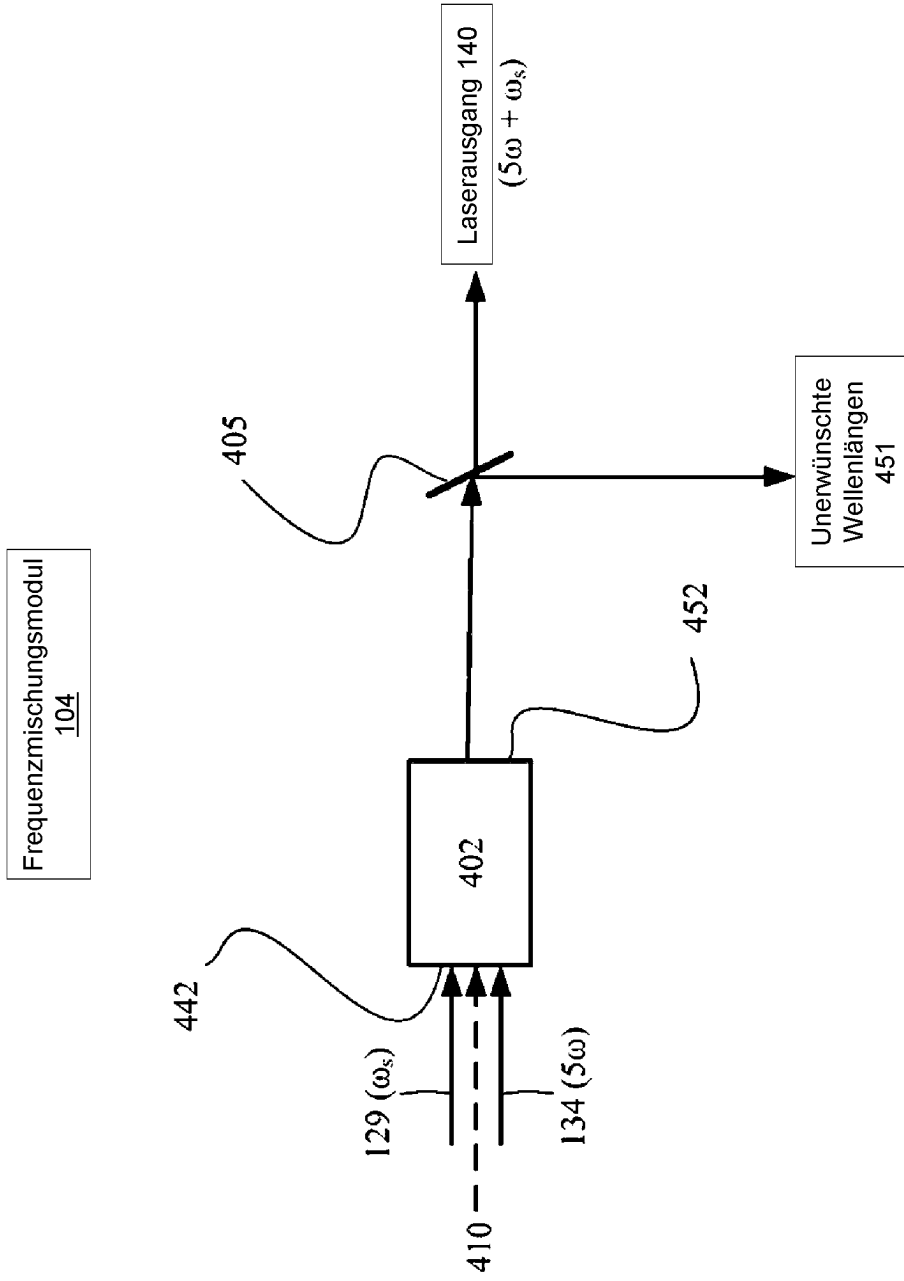


Fig. 4

ERSATZBLATT

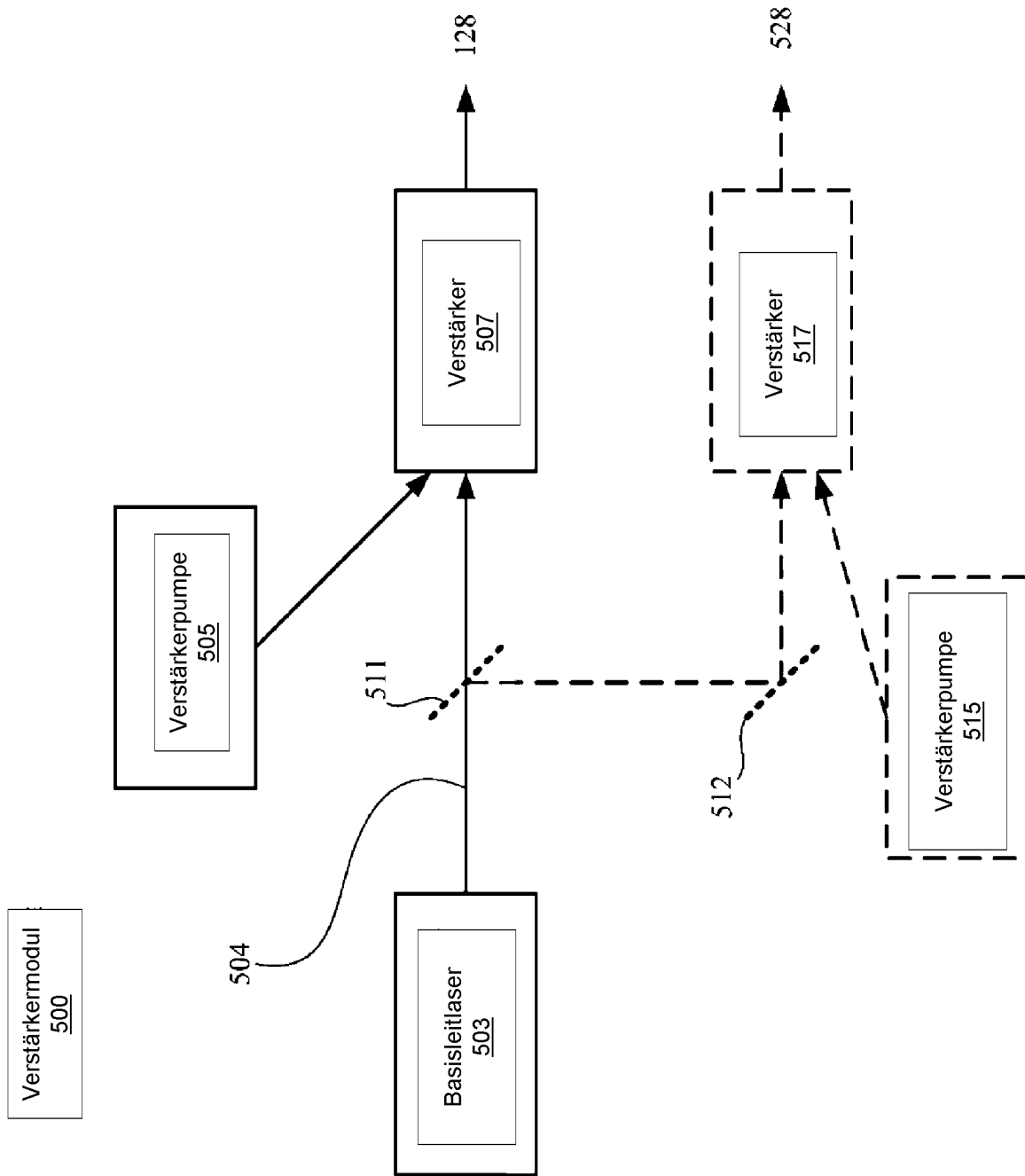


Fig. 5

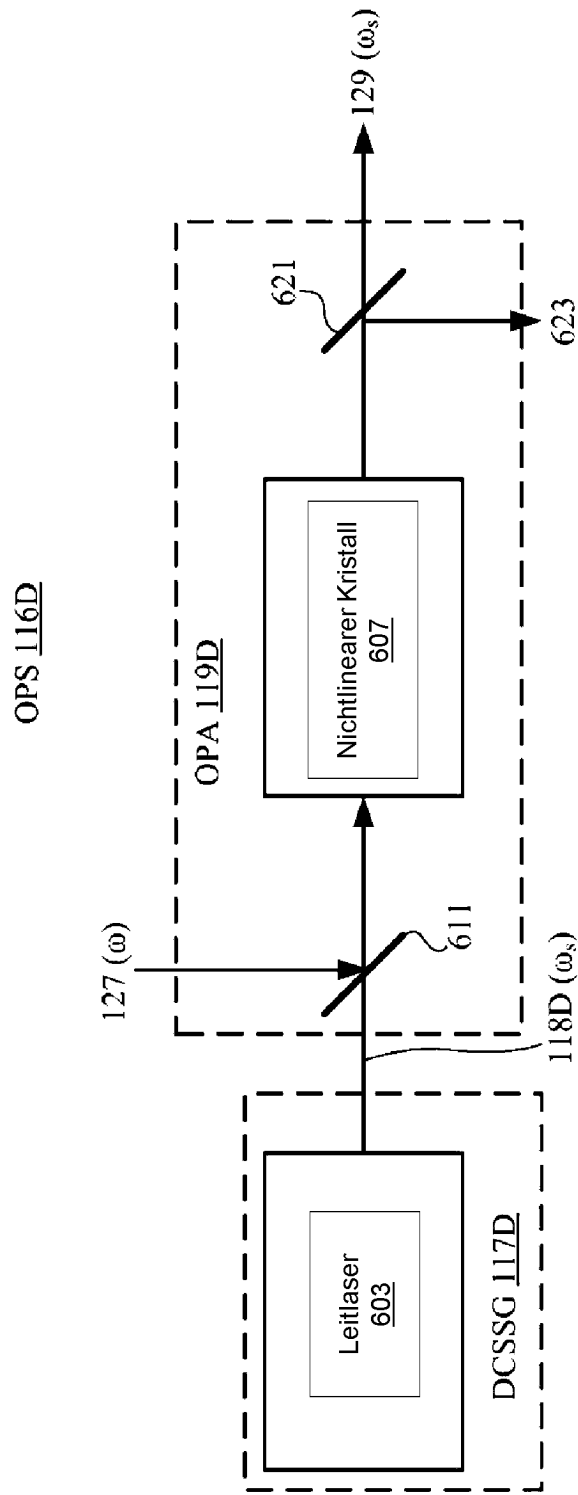
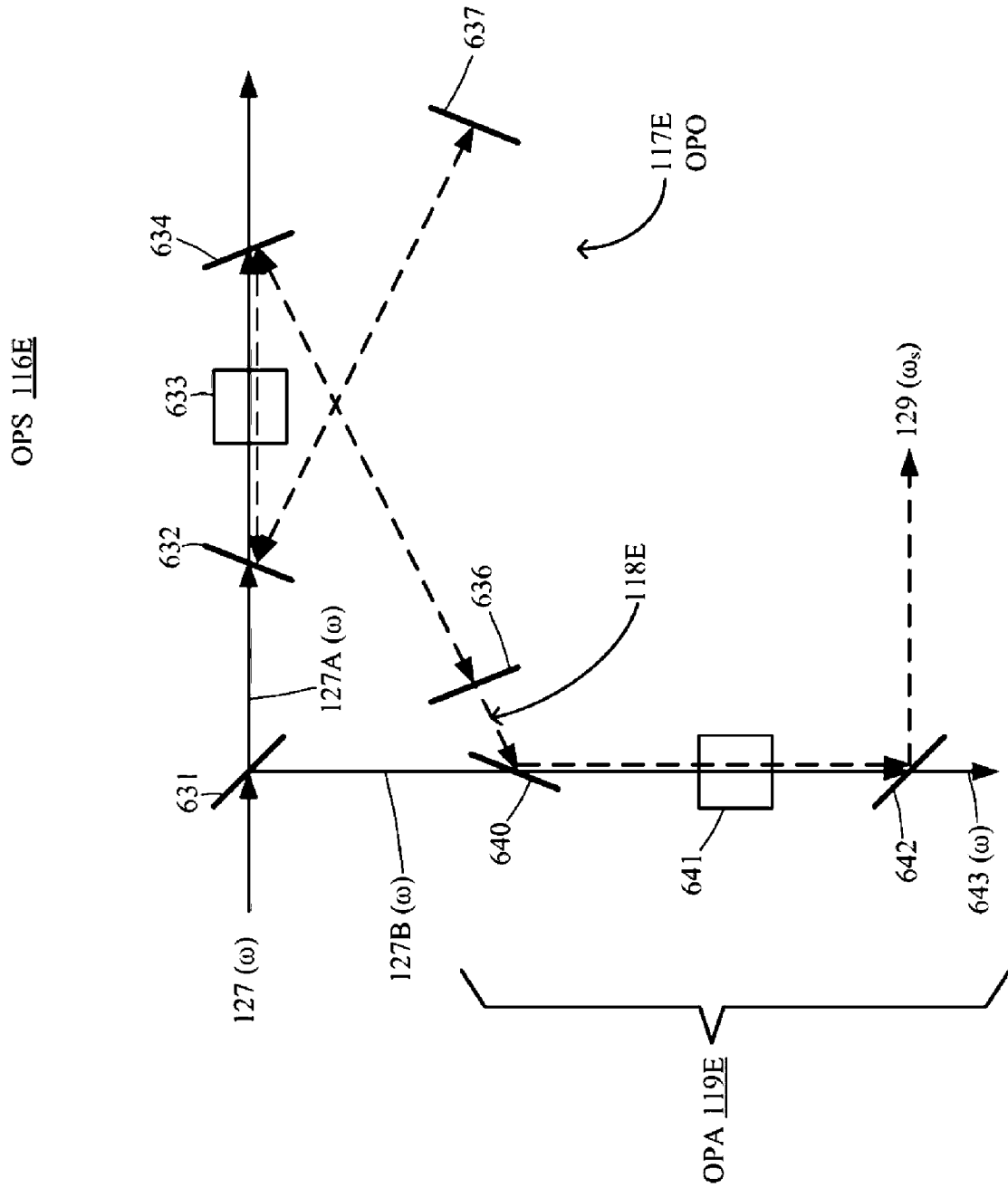


Fig. 6A



ERSATZBLATT

Fig. 6B

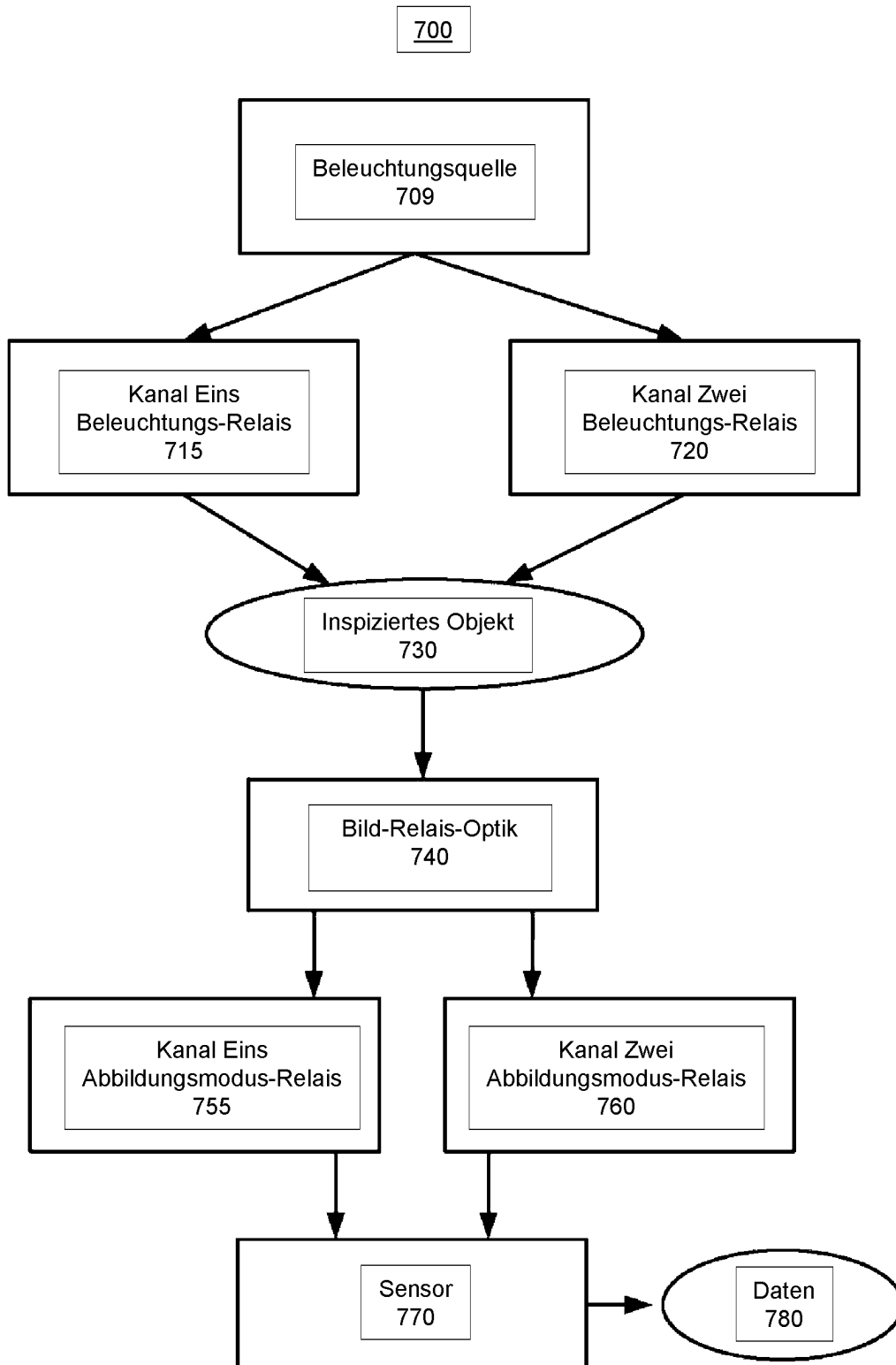


Fig. 7

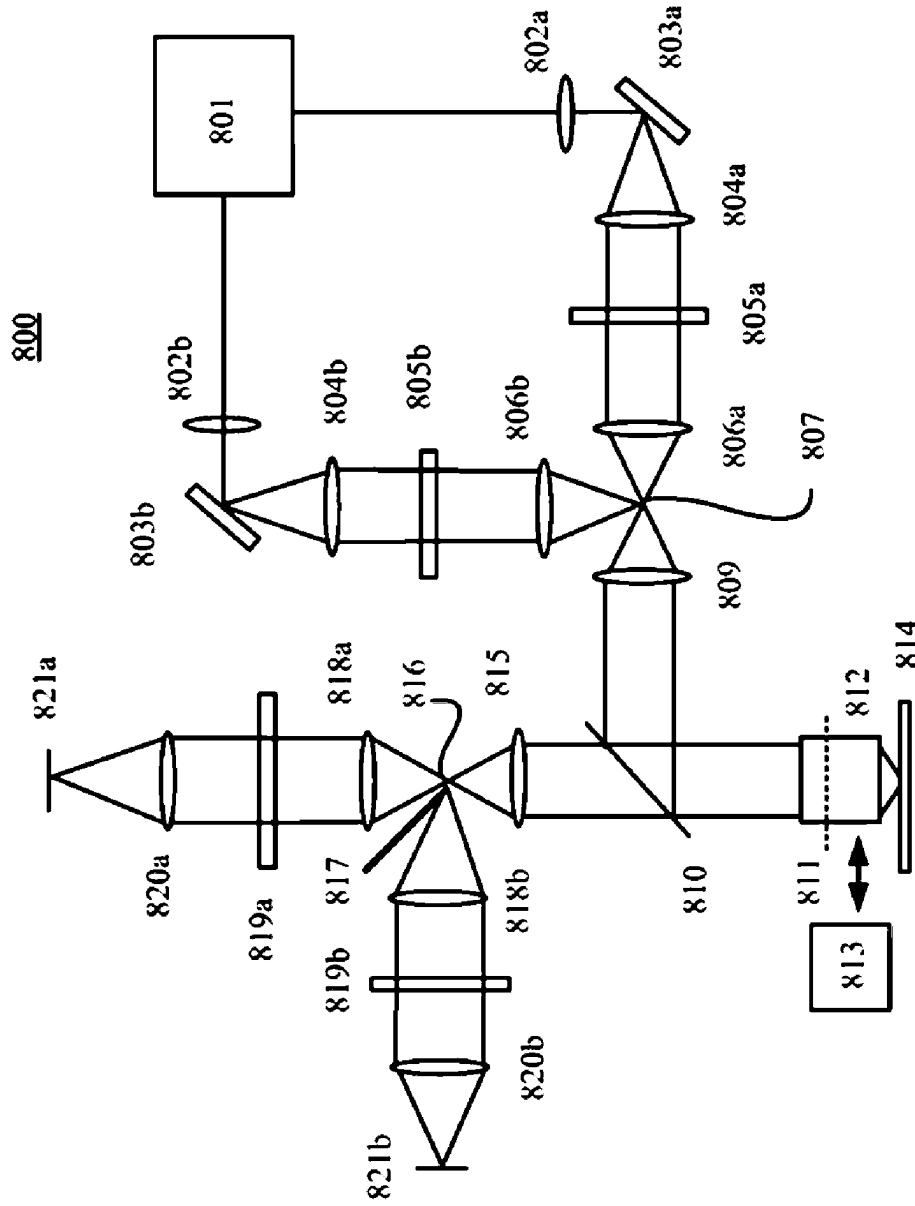


Fig. 8

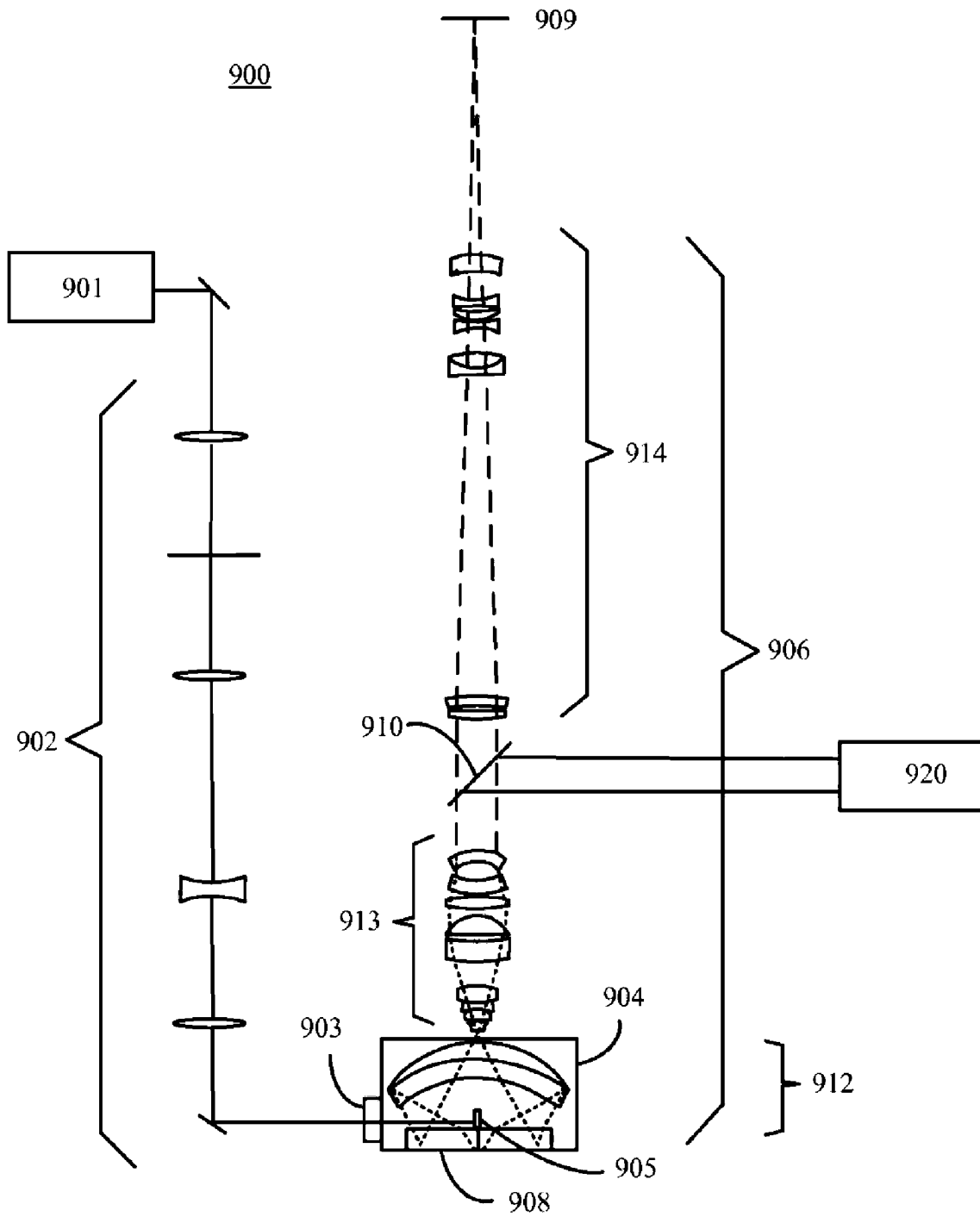
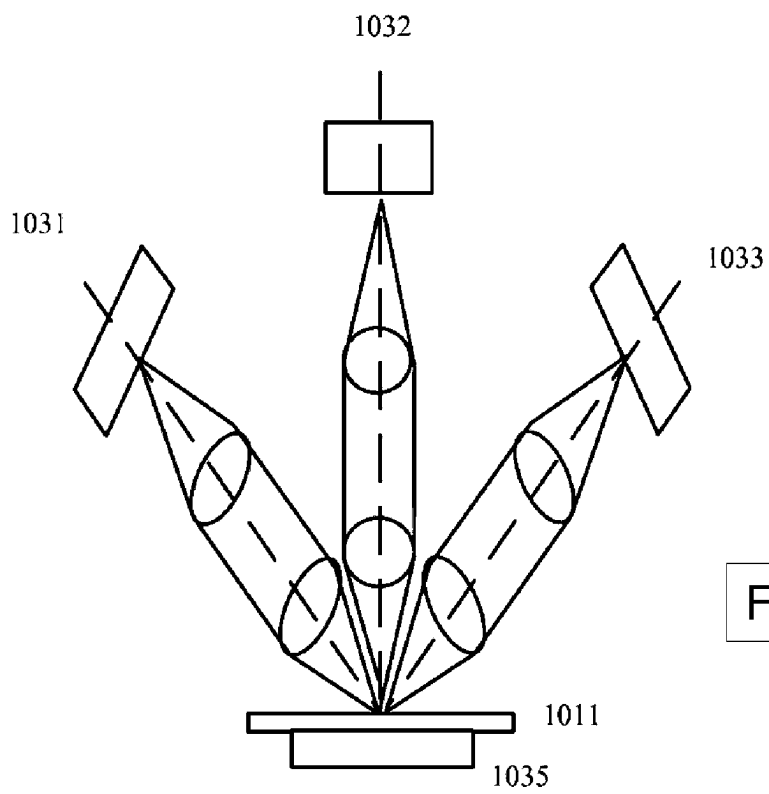
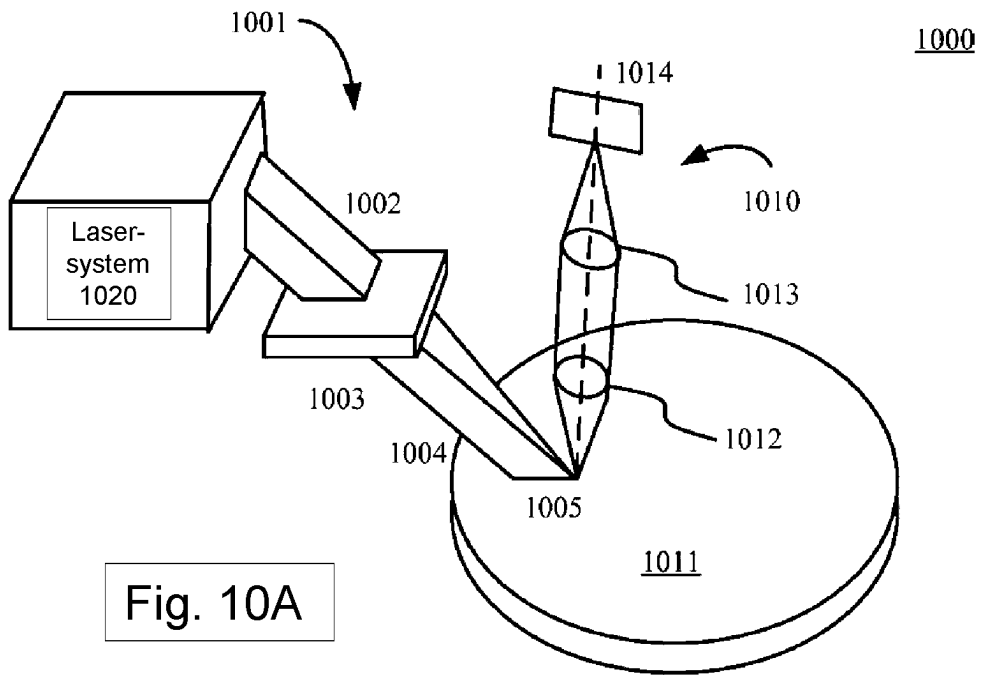


Fig. 9



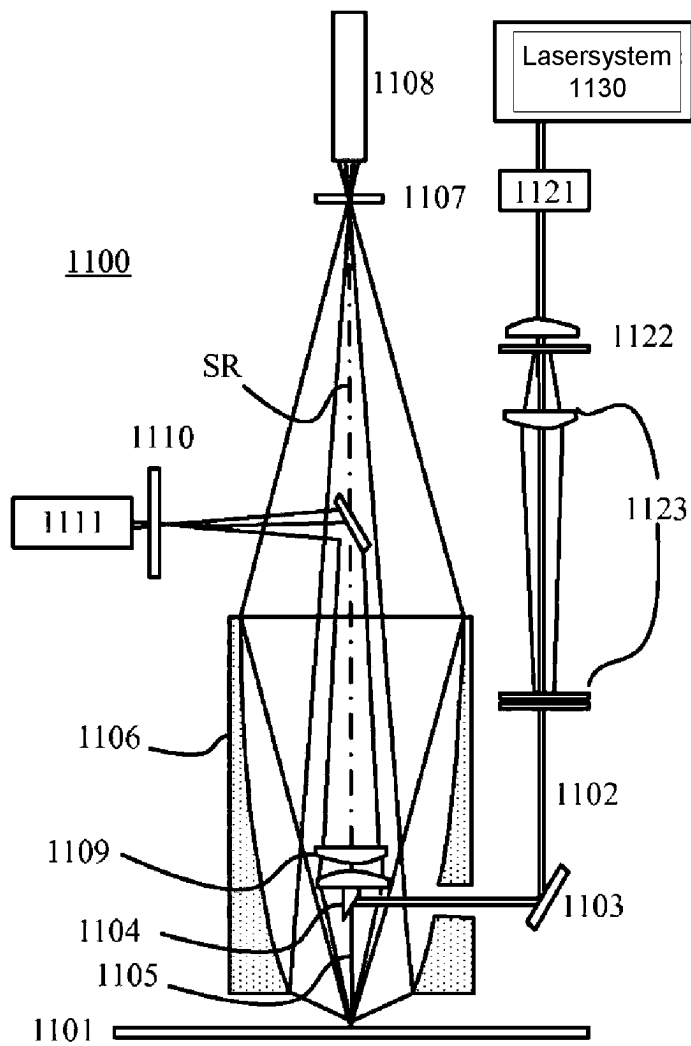


Fig. 11

1200

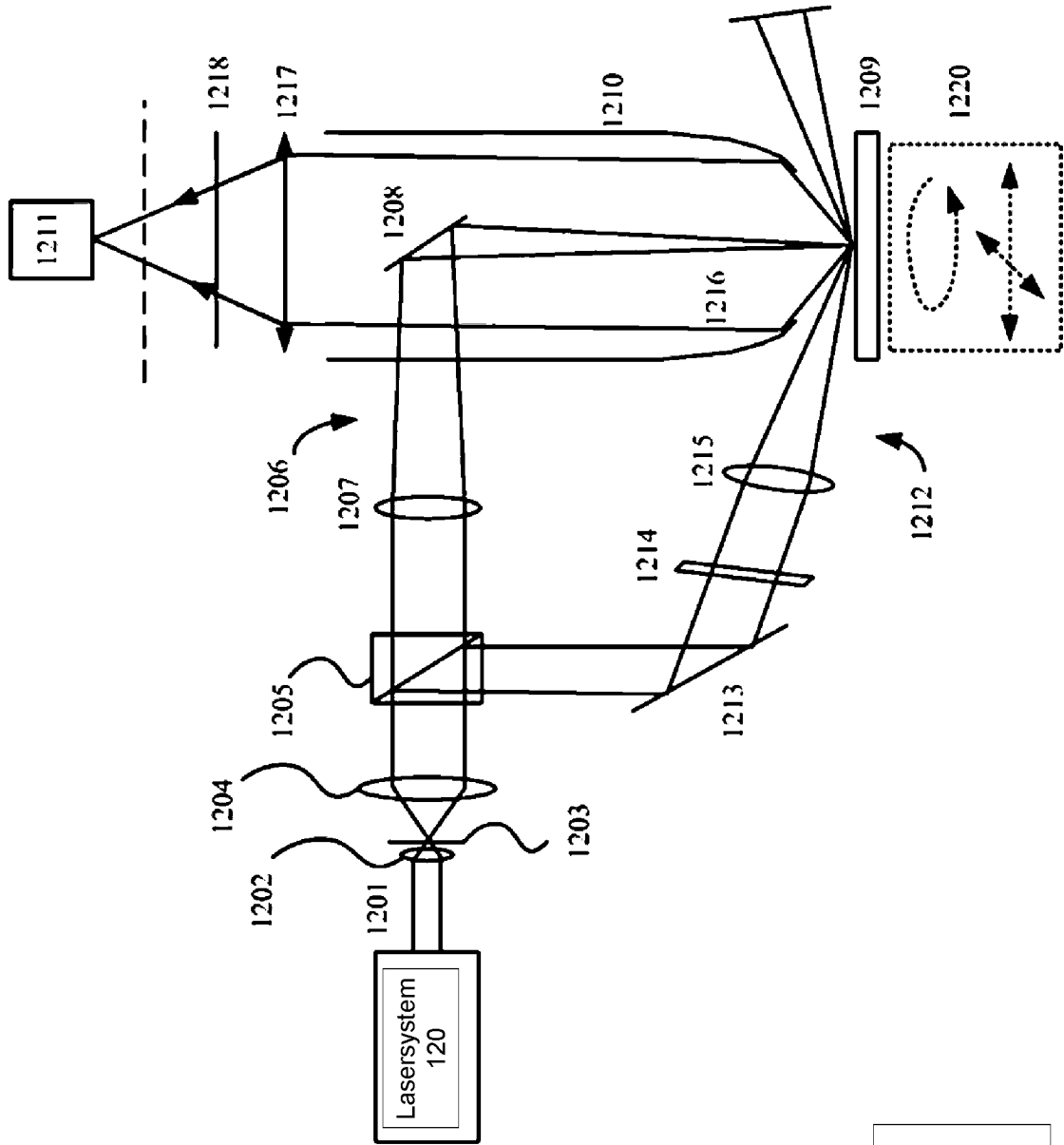


Fig. 12

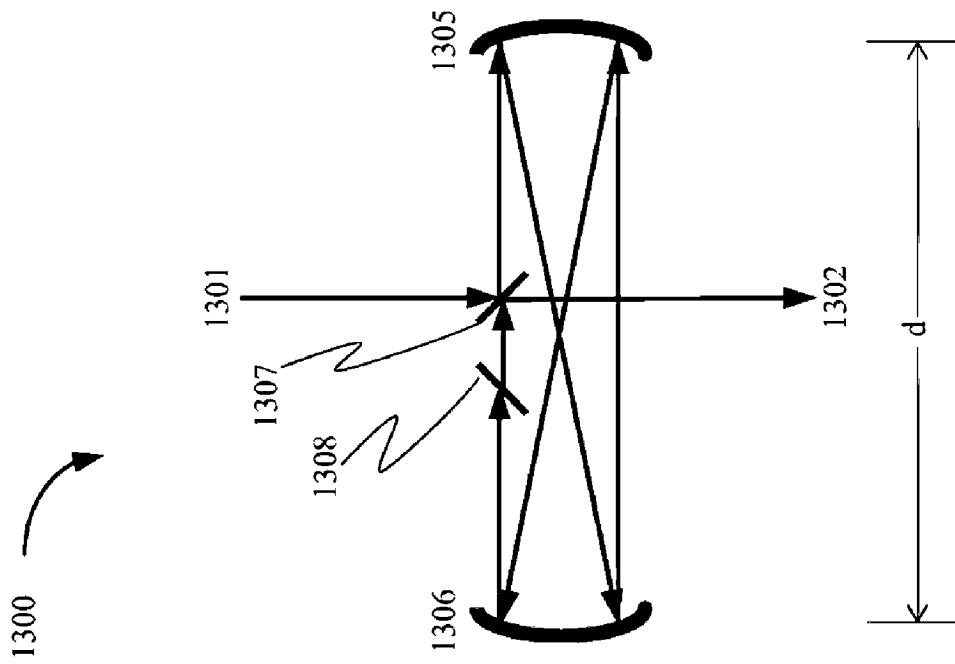


Fig. 13

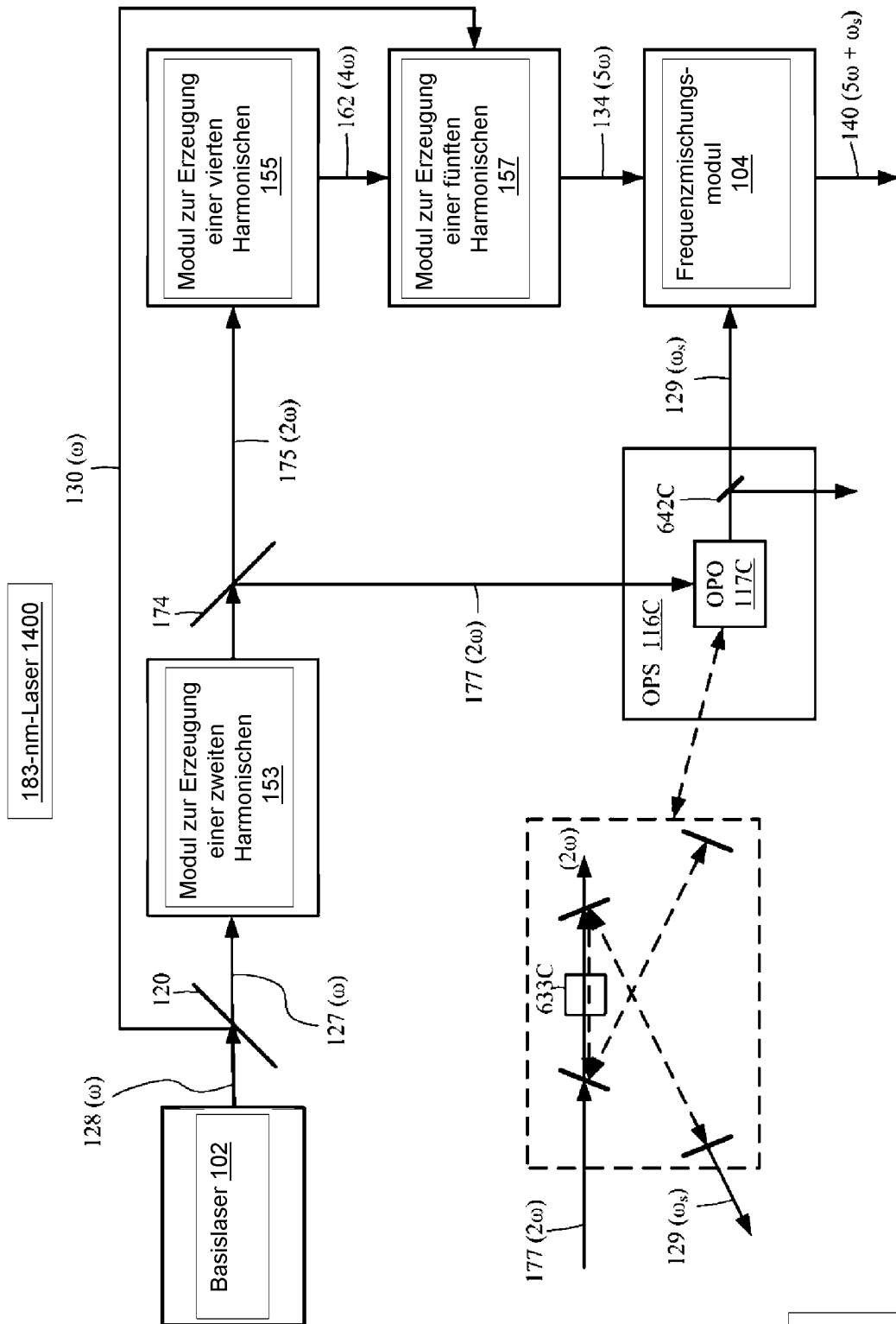


Fig. 14