



(12) **Patentschrift**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2014 005 980.3**
 (86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2014/070656**
 (87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/095224**
 (86) PCT-Anmeldetag: **16.12.2014**
 (87) PCT-Veröffentlichungstag: **25.06.2015**
 (43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
 in deutscher Übersetzung: **24.11.2016**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **02.02.2023**

(51) Int Cl.: **H01S 3/22 (2006.01)**
H01S 3/10 (2006.01)
H01S 3/225 (2006.01)
H01S 3/0933 (2006.01)
H01S 3/094 (2006.01)
H01S 3/036 (2006.01)
G01N 21/956 (2006.01)
G03F 7/20 (2006.01)

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

<p>(30) Unionspriorität:</p> <table border="0"> <tr> <td>61/917,339</td> <td>17.12.2013</td> <td>US</td> </tr> <tr> <td>14/571,100</td> <td>15.12.2014</td> <td>US</td> </tr> </table> <p>(73) Patentinhaber: KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US</p> <p>(74) Vertreter: Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte, 93049 Regensburg, DE</p>	61/917,339	17.12.2013	US	14/571,100	15.12.2014	US	<p>(72) Erfinder: Solarz, Richart, Danville, Calif., US; Bezel, Ilya V., Sunnyvale, Calif., US; Shchemelinin, Anatoly, Bozeman, Mont., US</p> <p>(56) Ermittelte Stand der Technik:</p> <table border="0"> <tr> <td>US</td> <td>2011 / 0 181 191</td> <td>A1</td> </tr> <tr> <td>WO</td> <td>2012/ 154 468</td> <td>A2</td> </tr> <tr> <td>JP</td> <td>2010- 114 399</td> <td>A</td> </tr> </table>	US	2011 / 0 181 191	A1	WO	2012/ 154 468	A2	JP	2010- 114 399	A
61/917,339	17.12.2013	US														
14/571,100	15.12.2014	US														
US	2011 / 0 181 191	A1														
WO	2012/ 154 468	A2														
JP	2010- 114 399	A														

(54) Bezeichnung: **SUB-200NM Laser gepumpter homonuklearer Excimerlaser**

(57) Hauptanspruch: Eine Laser-Vorrichtung (300) zum Erzeugen einer kohärenten Dauerstrich-(cw)-Ausgangsstrahlung (310) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, umfassend:

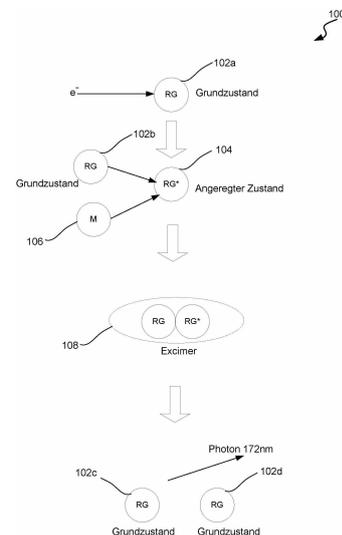
eine Kammer (204, 304) zum Aufnehmen mindestens eines Edelgases oder von Edelgasgemischen;
 eine Pumplaserquelle (102) zum Erzeugen mindestens eines CW-Pumplaserstrahls (203) der in die Kammer (204) zum Erzeugen mindestens eines mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208, 302), das Excimer-Emissionen aufweist, in der Kammer (204, 304) fokussiert ist; und

eine optische Kavität, die zum Ausbilden eines konfokalen oder instabilen Resonators innerhalb der Kammer (304) vorgesehen ist, um eine Rückkopplung an die Excimer-Emissionen des mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (302) bereitzustellen, zum Erzeugen mindestens eines Dauerstrich-(cw)-Lasers (310) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, wobei das mindestens eine mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltene Plasma (302) eine Form eines Zylinders oder Stifts hat, wobei die optische Kavität umfasst:

(i) einen ersten Spiegel (306a), der aus Materialien geformt ist, die Wellenlängen größer oder gleich der Wellenlänge des CW-Pump lasers übertragen und eine hohe Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die zumindest einen

Abschnitt eines Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, und

(ii) einen zweiten Spiegel (306b), der aus Materialien geformt ist, die eine Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die mindestens einen Abschnitt des Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, dadurch gekennzeichnet, ...



Beschreibung

Verweis auf verwandte Anmeldungen

[0001] Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der provisorischen US - Patentanmeldung mit der Anmeldenummer 61/917,339, Titel „Sub 200nm Laser Pumped Homonuclear Excimer Lasers“, angemeldet am 17. Dezember 2013 durch Richard W. Solarz et al., die durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit aufgenommen ist.

Technisches Gebiet der Erfindung

[0002] Die Erfindung betrifft im Allgemeinen ein Gebiet der Wafer- und Maskeninspektion. Insbesondere betrifft die Erfindung eine Vorrichtung und Techniken zum Bereitstellen von kohärenten Dauerstrich-Lichtquellen (CW-Lichtquellen) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm.

Hintergrund der Erfindung

[0003] Im Allgemeinen verwendet die Halbleiterfertigungsindustrie hochkomplexe Techniken zum Herstellen von integrierten Schaltkreisen, wobei Halbleitermaterialien verwendet werden, die auf ein Substrat, beispielsweise Silizium, geschichtet und gebildet werden. Ein integrierter Schaltkreis wird typischerweise aus einer Vielzahl von Masken (englisch „reticles“) hergestellt. Die Erzeugung von Masken und anschließende optische Inspektion solcher Masken sind mittlerweile zu Standardschritten bei der Produktion von Halbleitern geworden. Zunächst stellen Schaltkreisdesigner Schaltkreismusterdaten zur Verfügung, die ein spezielles Design eines integrierten Schaltkreises (IC) beschreiben, beispielsweise für ein Masken-Produktionssystem oder einen Masken-Schreiber.

[0004] Aufgrund der umfangreichen Schaltkreisintegration und der abnehmenden Größe von Halbleitervorrichtungen sind die Masken und hergestellten Vorrichtungen immer empfindlicher bezüglich Defekten geworden. Das heißt, dass Defekte, die Fehler in der Vorrichtung verursachen, immer kleiner werden. Es wird im Allgemeinen als erforderlich erachtet, dass die Vorrichtung vor Auslieferung an die Endnutzer oder Kunden fehlerfrei ist.

[0005] In der Halbleiterindustrie werden unterschiedliche Inspektionssysteme verwendet, um Defekte auf einer Halbleiter-Maske oder einem Wafer zu ermitteln. Ein Typ einer Inspektionsmaschine ist ein optisches Inspektionssystem. In optischen Inspektionssystemen werden ein oder mehrere Beleuchtungsstrahlen in Richtung des Halbleiter-Wafers oder der Maske geführt, und ein reflektierter und/oder gestreuter Strahl wird dann ermittelt. Der ermittelte Strahl wird dazu verwendet,

um dann ein detektiertes elektrisches Signal oder ein Bild zu erzeugen, und solch ein Signal oder Bild wird dann analysiert um zu bestimmen, ob auf dem Wafer Defekte vorhanden sind.

[0006] Laser werden in vielen Inspektionssystemen auch als Lichtquellen verwendet, um Defekte auf Masken oder Wafern zu messen. Laser stellen ein Licht mit einer hohen Helligkeit bereit und können einen gebündelten Lichtstrahl zur Verfügung stellen, der auf einfache Weise durch Linsen und in Richtung der Probe geführt werden kann. Zusätzlich können Laserquellen mit einer kurzen Wellenlänge, beispielsweise, unterhalb von 200 nm, vorteilhafterweise zum Untersuchen von relativ kleinen Kenngrößen, verwendet werden. Die japanische Patentanmeldung JP 2010- 114 399 A beschreibt einen Excimer-Laser, der durch einen Dauerstrich-CO₂-Laser gepumpt wird. Dabei befindet sich Excimer-Gas in einer Kammer mit einem optischen Resonator. Die internationale Veröffentlichung WO 2012 /154 468 A2 betrifft die Erzeugung von Laserstrahlung mit Wellenlänge unter 208 nm. Zwei Grundwellenlängen werden jeweils verstärkt und in einem nichtlinearen Kristall gewandelt, um die gewünschte Laserstrahlung zu erhalten. Ebenso offenbart wird der Einsatz entsprechender Laseranordnungen in Systemen zur Inspektion oder Metrologie in der Halbleiterfertigung. Die US-Patentanmeldung US 2011/0 181 191 A1 beschreibt eine Vorrichtung zur Erzeugung von Licht auf Basis eines mittels Laser innerhalb einer Kammer ionisierten Gases.

[0007] Es gibt einen anhaltenden Bedarf für verbesserte Inspektionsmethoden und eine verbesserte Vorrichtung mit Lichtquellen mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, die nachfolgend auch mit „sub-200nm-Lichtquellen“ abgekürzt werden.

Beschreibung

[0008] Nachfolgend wird eine vereinfachte Zusammenfassung der Offenbarung gegeben, um ein grundlegendes Verständnis zu gewissen Ausführungsformen der Erfindung zu geben. Diese Zusammenfassung ist jedoch keine ausführliche Übersicht über die Offenbarung und sie identifiziert auch nicht wichtige beziehungsweise entscheidende Elemente der Erfindung oder beschränkt den Umfang der Erfindung. Ihr einziger Zweck ist, einige hierin offenbarte Konzepte in einer vereinfachten Form darzulegen, und zwar im Vorhinein zur detaillierteren Beschreibung, die danach dargelegt wird.

[0009] Es ist eine Laser-Vorrichtung zum Erzeugen einer kohärenten Dauerstrich (cw) Ausgangsstrahlung mit einer Wellenlänge von weniger als ungefähr 200 nm offenbart. Die Vorrichtung umfasst eine Kammer zum Aufnehmen mindestens eines Edelgases

oder von Edelgasgemischen und eine Pumplaserquelle zum Erzeugen mindestens eines CW-Pump lasers, der in der Kammer zum Erzeugen mindestens eines mit einem Laser aufrecht erhaltenen Plasmas in der Kammer fokussiert ist. Die Vorrichtung umfasst zudem ein Linsensystem zum Ausbilden einer optischen Kavität (optischer Resonator, optischer Hohlraum), in der das mindestens eine mit einem Laser aufrecht erhaltene Plasma als eine Anregungsquelle zum Erzeugen mindestens eines Dauerstrich (cw) Lasers mit einer Wellenlänge von weniger als ungefähr 200 nm dient.

[0010] Die Pumplaserquelle und das Linsensystem zum Ausbilden der optischen Kavität sind angeordnet, um den CW-Laser aus Excimer-Emissionen des mindestens einen Plasmas herzustellen. Die optische Kavität wird durch einen ersten Spiegel und einen zweiten Spiegel gebildet. Dabei ist der erste Spiegel aus Materialien geformt, die Wellenlängen größer oder gleich der Wellenlänge des CW-Pump lasers übertragen und eine hohe Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die mindestens einen Abschnitt eines Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen; und der zweite Spiegel ist aus Materialien geformt, die eine Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die mindestens einen Abschnitt des Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen. Gemäß der Erfindung ist die Pumplaserquelle eine Vielzahl von Faserbündeln von inkohärenten Dioden oder eine Vielzahl von Faserbündeln von Yb-basierten aktiven Medien.

[0011] Bei einer spezifischen Ausführungsform ist die Kammer zum Aufnehmen und Halten des Edelgases oder der Edelgasgemische bei einem Druck von mehr als ungefähr 10 bar konfiguriert. Gemäß einem anderen Aspekt umfasst das Edelgas oder das Edelgasgemisch eines oder mehrere der folgenden Gase: Xe, Kr, oder Ar. Gemäß einem noch anderen Beispiel sind die Pumplaserquelle und das Linsensystem zum Erzeugen des CW-Lasers aus Excimer-Emissionen des mindestens einen Plasmas angeordnet. Gemäß einem anderen Ausführungsformaspekt umfasst die Laser-Vorrichtung zudem ein Lasermedium, das in der optischen Kavität angeordnet ist. Bei diesem Aspekt ist das Lasermedium derart angeordnet, dass durch Excimer angeregte Zustände verwendet werden, um mittels Stößen Energie auf angeregte atomare Zustände zu übertragen, um den CW-Laser aus dem Lasermedium herzustellen. Bei einem anderen Beispiel weist der CW-Laser eine Wellenlänge im Ultraviolett (UV) oder Vakuum-UV auf.

[0012] Bei einer alternativen Ausführungsform ist die Kammer zum Aufnehmen und Aufbewahren des Edelgases oder der Edelgasgemische bei einem Druck von mehr als ungefähr 10 atm konfiguriert. Bei einer anderen Ausführungsform weist die Pum-

plaserquelle eine Wellenlänge von entweder größer oder gleich ungefähr 0,8 bis 0,9 μm oder größer oder gleich ungefähr 1 μm und eine Durchschnittsleistung von größer oder gleich 1kW auf. Gemäß einem anderen Aspekt weist das Edelgas mindestens einen relativen Fülldruck von 51% im Vergleich mit etwaigen heterodimerischen Gasen in der Kammer auf. Bei einer anderen Ausführungsform umfasst die Laser-Vorrichtung eine Pumpe zum Durchströmen des Edelgases oder der Edelgasgemische durch die Kammer.

[0013] Bei einer anderen Ausführungsform sind die Pumplaserquelle und das Linsensystem zum Ausbilden der optischen Kavität angeordnet, um Excimer-Emissionen in dem mindestens einen mit einem Laser aufrecht erhaltenen Plasma durch eine kleine Signal-Verstärkung im Einfachdurchgang von mindestens 0,2 zu erzeugen. Gemäß einem weiteren Aspekt basiert die Verstärkung auf einer Konzentrationsanzahl einer angeregten Population multipliziert mit einem Emissions-Wirkungsquerschnitt multipliziert mit einer Länge der optischen Kavität und einem aktiven Lasermedium mit einem Bereich von mehr als 2.

[0014] Bei einer anderen Ausführungsform weist die optische Kavität eine Länge von ungefähr 1mm bis 10cm und einen Durchmesser von ungefähr 100 μm bis 3mm auf. Gemäß einem weiteren Aspekt weist das mindestens eine mit einem Laser aufrecht erhaltene Plasma eine Form auf, die im Wesentlichen einer Form der optischen Kavität entspricht. Bei einem noch weiteren Beispiel umfasst die Laser-Vorrichtung eine zweite Kammer mit einem Durchgang (Düse). Gemäß diesem Aspekt ist die erste Kammer so konfiguriert, dass sie einen ersten Druck aufweist, und die zweite Kammer ist so konfiguriert, dass sie einen zweiten Druck aufweist, der deutlich niedriger als der erste Druck ist, so dass ein gepresster (extrudierter) Teil des mindestens einen mit einem Laser aufrecht erhaltenen Plasmas aus der ersten Kammer, durch den Durchgang, bis in die zweite Kammer gepresst wird. Bei diesem Aspekt ist das Linsensystem zum Ausbilden der optischen Kavität in der zweiten Kammer angeordnet, so dass der gepresste Teil aufgenommen werden kann. Bei einem Beispiel beträgt der erste Druck mehr als ungefähr 10 bar und der zweite Druck beträgt weniger als ungefähr 1,33 mbar (1 Torr), und der Durchgang weist einen Durchmesser von ungefähr 30 bis 200 μm auf. Gemäß einem anderen Aspekt umfasst die Pumplaserquelle eine Vielzahl von Faserbündeln zum Erzeugen einer Vielzahl von CW-Lasern, um eine Vielzahl von mit einem Laser aufrecht erhaltenen Mikroplasmen auszubilden, die entlang der Länge der optischen Kavität ausgerichtet sind. Bei einer anderen Ausführungsform umfasst das Linsensystem zum Ausbilden der optischen Kavität ein oder mehrere Elemente zum Verengen von Strahlen.

[0015] Bei einer anderen Ausführungsform betrifft die Erfindung ein Inspektionssystem zum Inspizieren einer fotolithografischen Maske oder Wafers nach Defekten. Das Inspektionssystem umfasst eine Laser-Vorrichtung gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen und eine Abbildungsoptik zum Lenken des Ausgangsstrahls in Richtung einer Maske oder eines Wafers. Dieses System umfasst auch einen Detektor zum Aufnehmen eines zu detektierenden Signals oder Bilds als Antwort auf den Ausgangsstrahl, der von der Maske oder dem Wafer reflektiert oder gestreut oder von der Maske oder dem Wafer hindurchgelassen wurde; und einen Prozessor und Speicher, die derart konfiguriert sind, um das detektierte Signal oder Bild zu analysieren und Defekte auf der Maske oder dem Wafer zu detektieren.

[0016] Bei einer anderen Ausführungsform betrifft die Erfindung ein Fotolithografiesystem zum Übertragen eines Musters von einer Maske auf einen Wafer. Das Fotolithografiesystem umfasst eine Laser-Vorrichtung gemäß einer der oben beschriebenen Ausführungsformen und eine Abbildungsoptik zum Lenken des Ausgangsstrahls durch eine Maske auf einen Wafer.

[0017] Bei einer alternativen Ausführungsform betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Erzeugen einer Ausgangsstrahlung mit einer Wellenlänge von weniger als ungefähr 200 nm. Es wird mindestens ein mit einem Laser aufrecht erhaltenes Plasma erzeugt, um Excimer-Emissionen innerhalb einer Laserkavität zu erzeugen. Basierend auf den Excimer-Emissionen wird ein Excimerlaser aus der Laserkavität ausgesendet. Der Excimerlaser wird in Richtung einer Halbleiterprobe geführt. Die Halbleiterprobe wird inspiziert basierend auf dem Ausgangslicht, das von der Halbleiterprobe als Antwort auf den Excimerlaser auf der Halbleiterprobe reflektiert oder gestreut wird.

[0018] Diese und andere Aspekte der Erfindung werden nachfolgend mit Bezug auf die Zeichnungen beschrieben.

Figurenliste

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung eines Prozesses zum Erzeugen eines Excimerlasers basierend auf einem homonuklearen Edelgas.

Fig. 2 ist eine detailliertere Darstellung eines Excimerlaser-Generators.

Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Generators für eine Excimerlaser-Quelle gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

Fig. 4 ist eine schematische Darstellung eines Plasmagenerators gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

Fig. 5 zeigt eine Vielzahl von Faserbündeln, die angeordnet sind, um ihr Licht gemäß einer alternativen Ausführungsform auf denselben Punkt zu richten.

Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das ein Verfahren zum Erzeugen von Dauerstrich (cw) Excimerlasern gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt.

Fig. 7A ist eine vereinfachte schematische Darstellung eines lithografischen Systems zum Übertragen eines Maskenmusters von einer Maske auf einen Wafer gemäß bestimmten Ausführungsformen.

Fig. 7B ist eine schematische Darstellung einer Inspektionsvorrichtung gemäß bestimmten Ausführungsformen.

Detaillierte Beschreibung von Ausführungsbeispielen

[0019] In der nachfolgenden Beschreibung werden zahlreiche spezifische Details dargelegt, um für ein umfassendes Verständnis der vorliegenden Erfindung zu liefern. Die vorliegende Erfindung kann ohne einige oder ohne alle dieser bestimmten Details ausgeführt werden. In anderen Beispielen werden wohlbekanntere Komponenten oder Prozessabläufe nicht im Detail beschrieben, um die vorliegende Erfindung nicht unnötig zu verschleiern. Obwohl die Erfindung in Verbindung mit den spezifischen Ausführungsformen beschrieben wird, ist offensichtlich und klar, dass die Erfindung nicht auf die Ausführungsformen beschränkt ist.

EINLEITUNG

[0020] Laser, die eine Wellenlänge von weniger als 200nm aufweisen, nachfolgend auch mit „sub-200nm-Laser“ abgekürzt, insbesondere CW (Dauerstrich) Laser mit hoher Leistung, sind für die Inspektion von Siliziumbasierten Halbleiterwafern äußerst wünschenswert. Es ist oft so, dass die in der Halbleiter-Laser Fertigung verwendeten Materialien Reflektivitäten und Absorptionslängen aufweisen, die auch für die Chip-Inspektion bis hinunter auf 90nm und mit kurzen Wellenlängen bis zu 50 nm wünschenswert bleiben. Da die Empfindlichkeit von Wafer-Inspektionsmaschinen für die Defekterkennung proportional zum Kehrwert der Wellenlänge des Lasers mit mindestens eins potenziert ist (abhängig von der jeweiligen Anwendung), werden Kurzwellenlängen-Laser ständig für diese Anwendung entwickelt. Zudem wird CW (eher als gepulstes Format, egal ob als gütegeschaltete, modengekoppelte, strommodulierte oder andere gepulste For-

mate) auch aus dem Grund bevorzugt, weil Schäden am Wafer durch Anwendung von CW-Licht minimiert werden können.

[0021] Kürzlich wurde große Aufmerksamkeit darauf gerichtet, dass die Wellenlängenregime von Festkörper-Lasern auf Bereiche von kürzeren Wellenlängen mittels Oberwellenumsetzung ausgedehnt werden können. Um eine hohe Umsetzungseffizienz zu erreichen, kann eine Oberwellenumsetzung mittels nichtlinearer Materialien erreicht werden, die an die fundamentalen und harmonischen Wellenlängen phasenangepasst sind. Um die Dynamik dieser nichtlinearen Materialien zu optimieren, können externe Kavitäten angeordnet sein, die das nichtlineare Material enthalten und die fundamentalen oder dynamischen Photonen innerhalb der Kavität rezirkulieren. Allerdings hat die Entwicklung dieser Materialien über die letzten zwanzig oder mehrere Jahre nicht zu sicheren, verlässlichen Vorrichtungen von über einem Watt geführt (5000 - 20000 Stunden). Daher ist ein sub-200nm-Laser, der im Betrieb keine nichtlinearen Materialien benötigt, äußerst wünschenswert.

[0022] Ein Excimer (ursprünglich verkürzt aus „excited dimer“, im Deutschen „angeregtes Dimer“) ist im Allgemeinen ein kurzlebige dimerisches oder heterodimerisches Molekül, das aus zwei Spezies gebildet ist, wobei mindestens eine der Spezies eine vollständig mit Elektronen gefüllte Valenzschale (Außenschale) hat (zum Beispiel Edelgase). In diesem Fall ist die Bildung solch eines Moleküls nur möglich, falls sich solch ein Atom in einem elektronisch angeregten Zustand befindet. Excimere können dazu verwendet werden, um ein Licht mit kurzer Wellenlänge zu erzeugen.

[0023] Heteronukleare Moleküle und Moleküle, die mehr als zwei Spezies haben, werden auch exziple Moleküle genannt (im Englischen „exciplex“ und hier ursprünglich verkürzt aus „excited“ complex). Einige Excimerlaser basieren auf heteronuklearen Edelgas-Halid-Verstärkungsmedien, beispielsweise ArF, XeF, KrF, ArCl, und Homologen, z.B. F₂ Lasern. Leider können Excimere, die auf heteronuklearen Edelgas-Halid-Verstärkungsmedien basieren, lediglich gepulste Laser bereitstellen (und nicht cw), die bei hoher Puls-Energie bei moderaten Wiederholungsraten arbeiten, wie zum Beispiel bis zu ungefähr 4 kHz für diese Vorrichtungen, die kommerziell erwerblich sind.

[0024] Die zugrunde liegende fundamentale Eigenschaft, die solchen auf Edelgas-Halid-Verstärkungsmedien basierenden Excimerlasern zugrunde liegt, ist, dass sie auf kurze Pulse mit moderaten Wiederholungsraten beschränkt sind. Dies rührt von der chemischen Kinetik der gebundenen Excimere her, da der obere Laserzustand besetzt ist. Ein Grund

für diese Beschränkungen ist, dass das Medium für die Bildung von gebundenen Excimern in Halid-basierten Entladungen die Harpoon-Reaktion von negativ geladenen Halid-Dimern mit ionischen Zuständen des Edelgases ist. Diese kinetischen Reaktionen resultieren in dem Verbrauch von Ausgangsmaterialien, gasartigen Halogen-Dimern, die als Halid-Atome bei diesen Reaktionen freigegeben werden. Die kinetische Umwandlung dieser resultierenden freien Atome in negativ geladene Halid-Dimer oder negativ geladene Halid-Ionen ist langsam und kann nicht dadurch verbessert werden, dass mehr Halid-Dimer in das anfängliche Gemisch zugefügt werden, da solch ein Hinzufügen das Lasern tilgt. Die kinetische Kette verbraucht ihre eigenen Reaktionspartner, wobei der einzige Lösungsansatz zum Steigern der Wiederholungsrate ist, dass die Reaktionspartner kontinuierlich zugeführt werden, um den Laserbereich mit neuem Material aufzufrischen. Die Pumpgeschwindigkeit steigt jedoch als vierte Potenz der Laser-Wiederholungsrate, was diesen Lösungsansatz untragbar macht. Daher werden Edelgas-Halide-Excimere und Halid-Excimere auf Formate mit kurzen Pulsen mit moderaten Wiederholungsraten zurückgestuft.

LASER GEPUMPTE HOMONUKLEARE EXCIMERLASER

[0025] Bestimmte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung stellen homonuklear-basierte Excimerlaser-Generatoren zur Verfügung, die cw Excimer UV (Ultraviolett) und Vakuum-UV Emissionen produzieren, bei denen der Verstärkungsbereich des Lasers erreicht und aufrechterhalten wird, indem ein Plasma mit einem Hochleistungs-CW Abregungs-Laser durch Fokussieren in eine Gaszelle erreicht wird, wobei die Gaszelle Gas unter Hochdruck (10 oder mehr Bar) enthält, die Excimere bilden können. Beispielsweise umfassen homonukleare Gase zweiatomige Edelgase, beispielsweise Xe₂, Kr₂, Ar₂, Ne₂, oder Gemische daraus, etc. Das Hinzufügen von leichteren Edelgas-Atomen, beispielsweise Helium oder Neon, zum Gemisch, kann sogar die benötigte Kinetik beschleunigen.

[0026] **Fig. 1** ist eine schematische Darstellung eines Prozesses zum Erzeugen eines Excimerlasers aus einem homonuklearen Edelgas. Wie gezeigt, kann ein Edelgas („rare gas“, RG) Atom 102a im Grundzustand durch ein Elektron e-angeregt werden, in einen angeregten Zustand Edelgas (RG*) Atom 104 überzugehen. Der bestimmende Reaktionsweg für die Bildung von gebundenen angeregten Excimern in homonuklearen Molekülen ist eine Kollision mit drei Partnern, zum Beispiel, zwei Edelgasatomen im Grundzustand mit einem angeregten Atom oder einem Ion des Edelgasmaterials. Im Beispiel nach **Fig. 1**, kollidiert RG 102b im Grundzustand mit dem angeregten RG* 104 und einem drit-

ten Partikel (M) 106, um das Edelgas-Excimer 108 zu bilden. Das dritte Partikel M kann ein anderes Edelgasatom des Gasgemisches sein, muss jedoch nicht notwendigerweise von demselben Edelgastyp wie das RG oder RG* Atom sein. Das Excimer ist kurzlebig und zerfällt in zwei Grundzustandsatome 102c und 102d, wobei ein Photon (beispielsweise, 172nm für Xe) frei wird. Wenn angeregte RG* 104 bei sehr hohen Drücken in wesentlichen Konzentrationen gebildet werden, wo Kollisionen der drei Partner das resultierende Excimere stabilisieren, kann genügend gespeicherte Energie erhalten werden, um eine CW-Laserschwingung innerhalb einer geeignet gestalteten Laserkavität aufrecht zu erhalten.

[0027] Zahlreiche Versuche wurden durchgeführt, um homonukleare zweiatomige CW-Excimere in ausreichender Konzentration unter Verwendung elektrischer Entladungsanregung zu bilden und zwar im Gegensatz zu unserem bevorzugten Verfahren, bei dem Laserpumpen verwendet werden, um das Plasma anzuregen. Aufgrund der sehr hohen Energiedichten pro Lebensdauer der gespeicherten Energie, die zum Aufrechterhalten der Oszillationen in diesen Vorrichtungen benötigt werden, Energiedichten in der Größenordnung von 100MW/cc oder mehr, sind die CW-Entladungen instabil und bislang ist man erfolglos darin gewesen, eine ausreichende Dichte an Speicherenergie bereit zu stellen, um cw Laser-Schwingung zu erzeugen. Typischerweise werden relativistische Elektronenstrahl-Pumpquellen mit Dauern von Zehnfachen von ns verwendet, um gepulste homonukleare zweiatomige Excimerlaser zu bilden, oder es werden elektrische CW-Entladungen verwendet, um eine inkohärente Strahlung aus diesen Spezies zu erhalten.

[0028] Die erzeugten Excimere können auch dazu verwendet werden, um deren Anregung mittels Stößen auf atomare angeregte Zustände von Spezies, beispielsweise Sauerstoff-Atome, Quecksilber Atome oder andere Atome mit starken Emissionen in den UV- und VUV-Bereichen, zu übertragen. Diese angeregten atomaren Zustände können als das Lasermedium verwendet werden. Mit anderen Worten können Atome, die im Allgemeinen zu Ionen im Plasma werden, dazu verwendet werden, um von den Excimeren all die Energie zu extrahieren und dann selbst zu Lasern werden.

[0029] Eine andere wünschenswerte Eigenschaft kann in einem homonuklearbasierten Excimer-Ansatz sein, dass nur Edelgas und Hochdruck-Gasgemische ihren angeregten, gespeicherten Zustand der Energie beibehalten und das selbst bei Drücken von 15 bis 18 atm oder mehr als 10 atm. Dieses Ergebnis ist ungleich dem von Edelgas-Haliden, die typischerweise bei ungefähr einem atm betrieben werden und deren Fluoreszenz bei Drücken, die deutlich über einigen atm liegen, versiegen. Daher

können diese homonuklearen CW-Excimere ihre niedrigeren stimulierten Emissions-Wirkungsquerschnitte dadurch kompensieren, dass sie einen höheren Gasdruck und dadurch eine höhere Verstärkungsleistung aufweisen.

[0030] Fig. 2 ist eine detailliertere Darstellung eines Excimerlaser-Generators 200. Wie hier gezeigt, kann das Excimerlasersystem 200 eine Laserpumpe 202 zum Erzeugen und Fokussieren eines CW-Laserstrahls 203 mit einer hohen Durchschnittsleistung umfassen, beispielsweise einen 0,8 bis 0,9µm Laser oder einen 1 µm Laser mit einer Durchschnittsleistung von ungefähr 1 bis 3kW oder mehr (oder größer oder gleich 1kW). Gemäß der Erfindung ist die Laserpumpe 202 in der Form von Faserbündeln von inkohärenten Dioden oder Faserbündeln von Yb-basierten aktiven Medien. Im Falle der inkohärenten Dioden ist das Faserbündel passiv und transportiert lediglich die Diodenstrahlung an das Ende des Kopplers. Bei diesem Beispiel können die Dioden Wellenlängen im nahen Infrarot bei einer Leistung von und mehr als 1 kW aufweisen. Beim Yb-basierten Laser können mehrere Pumpdioden mit jeder Faser gekoppelt sein, die ein mit Yb dotiertes Glas ist. Beide Faserquellen (passiv) oder Faserbündel (aktiv) können CW-Leistungen im Bereich von nahe oder mehr als ungefähr 1 kW bis sogar 30 kW aufweisen. Die mit Glas dotierte Faser absorbiert das Licht (beispielsweise das 0,8 Mikrometer Dioden-Licht) und wandelt es, zum Beispiel, in 1 Mikrometer Faser-Licht um. Beim Ansatz mit Yb ist die aus jeder Faser kommende Emission inkohärent bezüglich zu den einzelnen Fasern zueinander. Die Yb-Wellenlänge hat den Vorteil, dass keine Drift auftritt, so dass das resultierende, durch den Laser gepumpte Plasma zeitlich stabiler sein kann.

[0031] Bei einem Beispiel umfasst der Excimerlaser-Generator 200 eine Kammer 204, die mit mindestens einem Edelgas oder Gemisch gefüllt ist, wie hierin beschrieben. Bei einer Ausführungsform weist das Edelgas einen relativen Fülldruck auf, der größer oder gleich 51 % des in der Kammer enthaltenen Gases ist. Zum Beispiel enthält die Kammer ein Gas, bei dem der relative Fülldruck des untergeordneten Bestandteils zwischen 1 und 49 Prozent ist.

[0032] Der Druck in dieser Kammer 104 kann in einem Bereich von circa 10 bis 40 bar liegen. Sobald die Kammer 204 mittels einer Gaspumpe 212 durch ein Einlassventil 212a mit Gas gefüllt ist, um einen bestimmten Druck zu erreichen, kann das Einlassventil 212a dann geschlossen werden, um ein statisches Gas in der Kammer 204 zu bilden. Die Kammer 204 kann jede geeignete Form haben, beispielsweise eine Glühbirnenform. Bei alternativen Ausführungsformen kann die Gaspumpe 212 das Gas durch den Einlass 212a in die Kammer einströmen, durch die Kammer strömen und durch ein Aus-

lassventil 212b hinausströmen lassen, um einen Gasstrom zu bilden, der senkrecht zur optischen Kavität ist.

[0033] Der fokussierte Laser 203 verläuft durch oder um einen ersten Spiegel 206a, um auf das in der Kammer 204 enthaltene, im Wesentlichen homonukleare Gas zu fokussieren, um dadurch ein Plasma 208 zu bilden. Dieser erste Spiegel 206a ist aus Materialien geformt, die Wellenlängen größer oder gleich der Wellenlänge des Pumpasers übertragen, wie beispielsweise gleich oder größer als ungefähr 1 μm . Dieser erste Spiegel 206a weist auch eine hohe Reflektivität bei Wellenlängen auf, die mindestens einen Abschnitt des Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, beispielsweise, von ungefähr 165 bis 175nm für Xe_2^* . Der erste Spiegel 206a kann unterschiedliche Reflektivitätsbereiche aufweisen, wenn andere homonukleare Gase mit unterschiedlichen Excimer-Emissions-Wellenlängen verwendet werden.

[0034] Der erste Spiegel 206a ist bezüglich eines zweiten Spiegels 206b derart angeordnet, dass sie zusammen eine Laser-Kavität 207 für die bei der Excimer-Emission produzierten Photonen bilden. Der zweite Spiegel 206b ist aus Materialien geformt, die eine Reflektivität von größer oder gleich ungefähr 90% der erwarteten Excimer-Wellenlänge (beispielsweise 171 nm) aufweisen. Ein durch ein Excimer produzierter Laser 210 wird aus der optischen Kavität 207 ausgegeben.

[0035] Unabhängig von der jeweiligen Ausführungsform können die Spiegel der optischen Kavität einen konfokalen oder sogar instabilen Resonator bilden, um ein Feedback an die aktiven Medien zu geben. Das heißt, dass die Spiegel Krümmungsradien (R_1 und R_2) aufweisen können, die beide größer als die Länge L für konfokale Kavitäten betragen. Andere Typen von Resonatoren, solche wie beispielsweise instabile Resonatoren, können gebildet werden.

[0036] Im Allgemeinen kann ein durch Excimer produzierter Laser 210 aus einem homonuklearen Gas verwirklicht werden, wenn eine Inversion in der angeregten Population auftritt, beispielsweise, wenn die angeregte Population größer als die Population im niedrigeren Zustand der Population ist. Die kleine Signal-Verstärkung berechnet sich einfach als:

$$N^* \sigma L$$

[0037] wobei N^* die Konzentration (Anzahl pro Volumen) der angeregten Population des Materials ist, das sich in der Laserkavität befindet, in der der Laser hergestellt werden soll; σ ist der Emissions-Wirkungsquerschnitt; L ist die Weglänge der Laserkavität oder des Plasmas 208, das durch den Laserprozess gebildet wird. Oder auf andere Weise ausge-

drückt, ist N^* die Populationsdichte im angeregten Zustand, die jedes Photon gesehen hat, welche durch die Dichtezahl der angeregten Zustände gekennzeichnet ist, während σ der stimulierte Emissions-Wirkungsquerschnitt des Plasmas in der Laserkavität ist.

[0038] Das Ergebnis von $N^* \sigma L$ sollte im Allgemeinen bevorzugt größer als ungefähr 20%/L(cm) oder 0,2 sein, um einen durch Excimer produzierten Laser zu ergeben. Gemäß einem Beispiel liegt $N^* \sigma L$ in einem Bereich von 2 oder mehr. Falls $n^* \sigma L$ gleich 2 ist, bedeutet das, dass jedes Photon, das mittels der Excimeremissionsstimulation zwischen dem ersten und zweiten Spiegel produziert wird, zwei mehr zu erzeugende Photonen verursacht. Es ist ein ausreichend hoher Wert wünschenswert, um etwaige Verluste von Photonen zu kompensieren, was passieren kann, wenn der Laser durch die Kavität wandert. Photonenverluste können durch Reabsorption an den Beleuchtungsspiegeln, Diffraktion bei den Spiegeln, etc, verursacht werden.

[0039] Bei einem Beispiel ist σ ungefähr $8 \times 10^{-18} \text{cm}^2 \pm 10\%$ für Xe_2^* . Eine Mode der Laserkavität wird einen bestimmten Querschnittsdurchmesser D haben, beispielsweise ungefähr $200 \mu\text{m}$ für einen Transversal-Elektro-Magnetischen (TEM_{00}) Laser. In dem dargestellten Beispiel ist das Plasma 208 kugelförmig und wird einen größeren Durchmesser als den Querschnitt D des Lasers aufweisen, um auch die Länge L der optischen Kavität abzudecken. Allerdings wird das kugelförmige Plasma 208 Excimeremissionsbereiche haben werden, die nicht zur Bildung des Excimerlasers in der optischen Kavität beitragen werden.

[0040] Spiegel (beispielsweise 206a und 206b) können in der Kammer 204 angeordnet sein, um eine Länge L der Laserkavität zu erhalten, die so lang ist, damit sie praktikabel ist. Beispielsweise sind die Spiegel zueinander angeordnet, um eine Länge L zu bilden, die zwischen ungefähr 3mm und 10cm beträgt.

[0041] In dem dargestellten Beispiel gemäß **Fig. 2** bildet ein mit Laser aufrecht erhaltenes Plasma ungefähr eine Form einer Kugel aus. Eine Laserkavität extrahiert üblicherweise Strahlung aus einem Volumen, das beispielsweise wie ein Stift oder ein Zylinder mit einem ziemlich kleinen Radius (in der Größenordnung von Hunderten von Mikrometern) geformt ist, und dessen Länge der Abstand zwischen den zwei Kavitätsspiegeln ist. Bei der Erfindung wird das Plasma durch die Komponenten des Lasergenerators ausgeformt, um ein Plasma zu erhalten, das mittels Excimer-Anregung in Form eines Zylinders oder Stifts ausgebildet wird, so dass das Plasma besser an die Form der optischen Kavität angepasst wird. Zum Beispiel kann das Plasma in eine zylindri-

sche Geometrie geformt werden, indem es durch einen Durchgang (Düse) in eine differenziell gepumpte Vakuumkammer gepumpt wird, um das Excimer Verstärkungsvolumen noch besser an die durch die Laserspiegel ausgebildete optische Kavität anzupassen. Eine höhere Lasereffizienz kann somit unter Verwendung der Eigenschaft erreicht werden, dass das obere Niveau der Verstärkungsmedien weiter besteht (oder, genauer, kontinuierlich produziert wird) in einem Volumen, das sich mit der optischen Mode der Laserkavität deckt.

[0042] Bestimmte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung umfassen Mechanismen zum Erzeugen einer Plasmageometrie, die besser an die Laserkavität angepasst ist. Das heißt, dass ein oder mehrere mit Laser aufrecht erhaltene Plasmen als Anregungsquellen für CW-Excimerlaser verwendet werden, bei denen die Geometrie solcher mehreren Plasmen eine Gesamtlänge von ungefähr 1mm bis 10 cm und einen Durchmesser im Bereich von ungefähr 100µm bis zu einigen mm aufweisen.

[0043] Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Generators für eine Excimerlaserquelle gemäß einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Komponenten mit demselben Bezugszeichen wie Komponenten in Fig. 2 können denselben Aufbau oder Betriebsweise haben, wie oben beschrieben. Wie dargestellt, grenzt die erste Kammer 204 an die zweite Kammer 304, die im Wesentlichen auf einem Vakuum (beispielsweise, 1,33 mbar (1 Torr) oder weniger) gehalten wird. Die erste Kammer 204 kann jede geeignete Form aufweisen, beispielsweise, rechteckig wie die zweite Kammer 304. Differenzielles Pumpen kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass über den Einlass 212a Gas bis zu einem bestimmten Druck zur ersten Kammer hinzugefügt wird und über den Auslass 212b Gas aus der zweiten Kammer 304 abgeführt wird.

[0044] Erste und zweite Spiegel 306a und 306b bilden die optische Kavität aus, in die ein Plasmaabschnitt 302 durch den Durchgang 314 (Düse) in der ersten und zweiten aneinanderstoßenden Kammerwände als auch durch den ersten Spiegel 306a gepumpt wird. Das heißt, dass das Plasma 208 aus der Hochdruckkammer 204 durch den Durchgang 314 (Düse) in die zweite Niederdruckkammer 304 entweicht und sich in Überschallgeschwindigkeit ausdehnt, was ein differenzielles Pumpen darstellt. Das ausgestoßene (extrudierte) Plasma 302 kann ungefähr 1 cm lang sein, was ausreicht, um ein längliches, durch Excimer verstärktes Produkt zwischen den Spiegeln 306a und 306b auszubilden, um den Excimerlaser 310 bereitzustellen.

[0045] Bei dieser Ausführungsform bleibt das Plasma als ein heißes Plasma bestehen und behält

die Verstärkung sogar für Dauern von Mikrosekunden bei, nachdem es sich nicht länger direkt beim Brennpunkt des Pumpasers befindet (beispielsweise, Zehnfache von Mikrosekunden). Wenn also ein großes Laserplasma in einer Hochdruckkammer (10 bar oder mehr) erzeugt wird, kann entsprechend ein Durchgang an einer Seite solch einer Kammer ermöglichen, dass sich das Gas mit Überschallgeschwindigkeit in eine Niederdruckkammer (1,33 mbar (1 Torr) oder weniger) an der anderen Seite dieser Wand ausdehnt, in welcher Wand der Durchgang oder das Loch ausgebildet ist, wie in Fig. 3 dargestellt. Bei einer besonderen Ausführungsform weist der Durchgang einen Durchmesser von ungefähr 30 bis 200µm auf.

[0046] Jedes der hierin beschriebenen Laser-Erzeugungssysteme kann auch eines oder mehrere Elemente zum Verengen von Strahlen in der Laserkavität umfassen, beispielsweise Prismen oder Etalons (beispielsweise Bezugszeichen 316), um eine enge Strahlenemission zu produzieren, wobei „eng“ als jede Bandbreite definiert ist, die weniger als eine Hälfte der inkohärenten fluoreszenten Linienbreite ist.

[0047] Bei einem anderen Beispiel für lineares Plasma wird die Plasmageometrie dadurch erreicht, dass mehrere kleinere, durch Laser aufrecht erhaltene Plasmen linear konfiguriert sind, so dass das axiale Maß durch die Summe der einzelnen Durchmesser der linear angeordneten Mikroplasmen erhalten wird. Fig. 4 ist eine schematische Darstellung eines Plasmagenerators 400 gemäß einer alternativen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Wie dargestellt, umfasst der Plasmagenerator eine Vielzahl von Faserbündeln (beispielsweise Bezugszeichen 401a und 401 b), wobei jedes Faserbündel Pumplicht (beispielsweise Bezugszeichen 402a oder 402b) erzeugt. Diese separaten Faserbündel transportieren jeweils Licht, das jeweils ein separates Laser Mikroplasma (beispielsweise Bezugszeichen 404a oder 404b) anregt. Fig. 4 zeigt 12 separate Faserbündel, die in einer Linie angeordnet sind. Es kann jedoch jede geeignete Anzahl von Faserbündeln zum Produzieren jeder Anzahl von Mikroplasmen verwendet werden.

[0048] Bei diesem Beispiel wird der Mittelpunkt jedes Plasmas auf der Achse des (imaginären) Zylinders 406 erzeugt. Diese Anordnung ermöglicht, dass ein Spiegel bei jeder Kappe oder jedem Ende des Zylinders 406 platziert werden kann, so dass das System die größte Verstärkung für das Feedback in den Laser haben wird. Da die Verstärkung im Zylinder 406 bezogen ist auf das Produkt der Anzahl der Verstärkungs-Excimere pro Volumeneinheit multipliziert mit dem Querschnitt für stimulierte Emission und der Länge des zwischen den zwei Spiegeln enthaltenen, aktiven Plasmas, können die Fasern derart

ausgewählt und angeordnet werden, dass eine Länge erreicht wird, die äquivalent zu einer Photonenverstärkung bei einfachem Durchlauf zwischen den zwei Spiegeln ist. Falls diese Verstärkung die Verluste (beispielsweise durch Absorption, Streuung, etc.) überwiegt, wird ein Laser aus dem Ende des Zylinders 406 erzeugt.

[0049] Im Gegensatz dazu zeigt die Anordnung gemäß **Fig. 5** gemäß einer alternativen Ausführungsform eine Vielzahl von Faserbündeln (beispielsweise Bezugszeichen 502), die derart angeordnet sind, dass sich ihr Licht in demselben Punkt schneidet. Das Ergebnis dieser Anordnung ist, dass ein großer Ball an Plasma 503 ausgebildet wird. Bei diesem Beispiel ist das Plasma nicht „lang“ in Richtung der Zylinderachse 504. Diese Anordnung kann eine niedrigere Verstärkung haben und keine Laser resultiert. Allerdings können andere Anordnungen dieser Konfiguration eine Verstärkung erreichen, die die Verluste in der Laserkavität überschreitet, wie oben bezüglich **Fig. 2** beschrieben.

[0050] Bei 15 atm weisen diese Plasmen ungefähr eine Temperatur von 3 eV auf, was in einer Plasmadichte von ungefähr einem Zehntel der Dichte der Hochdruckgaszelle resultiert. Die Emission von Xenon nahe bei 170 nm hat gezeigt, dass sie ungefähr 6% der gesamten Emission beträgt. Bei Verwendung eines Wertes von $8 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ für den stimulierten Emissions-Wirkungsquerschnitt beträgt dann die kleine Signal-Verstärkung für das Plasma bei 170 nm mindestens 3 für ein Plasma mit der Länge 1 mm. Drücke in der Zelle betragen ab 15-10 atm und die Niveaus der Plasmaanregung betragen ungefähr 100 MW/cm². Diese Spezifikationen sind gut für die homonukleare Excimer-Produktion geeignet.

[0051] Excimer-Emission, die homonukleare Moleküle verwendet, resultiert in sehr kurzen Wellenlängen. Beispielsweise hat die grundlegende Wellenlänge der Excimer-Emission für Xe₂^{*} Dimer ihren Höhepunkt bei 171 nm, 146 nm für Kr₂^{*} Dimer; und 126 nm für Ar₂^{*} Dimer. Die Ausführungsformen für die Erzeugung von Excimerlasern der vorliegenden Erfindung erreichen diese Wellenlängen, ohne dass ein nichtlineares Material (beispielsweise Lithium-Triborat (LBO) oder Beta-Bariumborat (BBO) Kristalle, etc.) verwendet werden muss, um Harmonische in dem Laser auszubilden. Anders als Harmonischebasierte Lasersysteme können zudem CW-Excimerlaser-Generatoren der vorliegenden Erfindung einen Laser mit einer durchschnittlichen Ausgangsleistung von mindestens 5 Watt oder mehr bei einer gegebenen Lebensdauer produzieren.

[0052] **Fig. 6** ist ein Flussdiagramm, das ein Verfahren 600 zum Erzeugen von CW- Excimerlasern gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt. Zunächst wird gemäß Verfah-

rensschritt 602 mindestens ein mit einem Laser aufrecht erhaltenes Plasma erzeugt, so dass Excimer-Emissionen innerhalb einer Laserkavität erzeugt werden. Basierend auf solchen Excimer-Emissionen nach Schritt 604 wird dann gemäß Verfahrensschritt 604 ein Laser aus der Laserkavität ausgegeben. Gemäß Verfahrensschritt 606 wird dieser Laser-Excimer dann in Richtung einer Probe geführt, beispielsweise einem Halbleiterwafer oder einer Maske. Gemäß Verfahrensschritt 608 wird dann die Probe inspiziert (oder eine Messung kann auf solch einer Probe vorgenommen werden) basierend auf dem Ausgangslicht, das von der Probe als Antwort auf den Excimerlaser auf der Probe reflektiert oder gestreut wird.

Beispiele für Systeme:

[0053] Die hier beschriebene Laser-Vorrichtung kann in jedes geeignete optische System integriert werden. Beispiele für Systeme können ein Fotolithographiesystem, Halbleiterwafer- oder Maskeninspektionsmaschinen oder Metrologiemaschinen, etc. umfassen.

[0054] **Fig. 7A** ist eine vereinfachte schematische Darstellung eines typischen lithografischen Systems 700, das dazu verwendet werden kann, ein Maskenmuster von einer Maske M (Fotomaske) auf einen Wafer W gemäß bestimmten Ausführungsformen zu übertragen. Beispiele für solche Systeme umfassen Scanner und Stepper, insbesondere beispielsweise ein PAS 5500 System von ASML in Veldhoven, Niederlande. Im Allgemeinen lenkt eine Beleuchtungsquelle 703 einen Lichtstrahl durch eine Beleuchtungslinse 705 auf eine Maske M, die in einer Maskenebene 702 angeordnet ist.

[0055] Die Beleuchtungsquelle 703 kann die Form jeder der hierin beschriebenen Laser-Vorrichtungen haben. Die Beleuchtungslinse 705 hat eine numerische Apertur 701 bei der Ebene 702. Der Wert der numerischen Apertur 701 beeinflusst, welche Defekte auf der Maske lithografisch signifikante Defekte und welche Defekte keine lithografisch signifikanten Defekte sind. Ein durch die Maske M verlaufender Abschnitt des Strahls bildet ein gemustertes optisches Signal aus, das durch eine Abbildungsoptik 753 und auf einen Wafer W gelenkt wird, um das Übertragen des Muster zu initiieren.

[0056] **Fig. 7B** zeigt eine schematische Darstellung eines Inspektions- (oder Metrologie-) Systems 750, das gemäß bestimmten Ausführungsformen eine Abbildungslinse 751a mit einer relativ großen numerischen Apertur 751b bei einer Ebene 752 umfasst. Das dargestellte Inspektionssystem 750 umfasst eine Vergrößerungsoptik 753 für Mikroskope, die derart ausgestaltet ist, dass sie, zum Beispiel, eine 60- bis 1000-fache Vergrößerung für eine verbes-

serte Inspektion bietet. Die numerische Apertur 751b bei der Ebene 752 des Inspektionssystems ist oft beträchtlich größer als die numerische Apertur 701 bei der Ebene 702 des Lithografiesystems 700, was in Unterschieden zwischen Testinspektionsbildern und tatsächlich gedruckten Bildern resultieren würde. Jedes dieser optischen Systeme (700, 750) ruft unterschiedliche optische Effekte in den produzierten Bildern hervor, und solche Systeme können Techniken bzw. Methoden implementiert haben, so dass solche Effekte während eines Inspektions- oder Metrologie-Prozesses kompensiert werden.

[0057] Die vorliegende Laser-Vorrichtung kann an oder in zahlreichen speziell konfigurierten Inspektionssystemen implementiert werden, beispielsweise bei dem in **Fig. 7B** schematisch dargestellten Inspektionssystem. Das System 750 umfasst eine Beleuchtungsquelle 760, die einen Laserstrahl erzeugt, der mittels einer Beleuchtungsoptik 751 auf eine Probe S gerichtet wird, beispielsweise auf eine Maske oder auf einen Wafer in der Ebene 752. Eine andere Ausführungsform umfasst das Positionieren eines Strahlenteilers vor dem Wafer in der Ebene 752. Bei dieser Ausführungsform verläuft das Licht durch den Strahlenteiler, zu dem Wafer und wird zurück zum Strahlenteiler reflektiert, wobei der Strahlenteiler einen Abschnitt des Waferbilds zu dem Sensor lenkt, wobei der Sensor nun in einem Winkel zu den einfallenden und reflektierten Strahlwegen angeordnet ist. Die Lichtquelle kann die Form jeder hierin beschriebenen Laser-Vorrichtung annehmen, um ein Licht mit einer Wellenlänge von weniger als 200nm zu erzeugen. Wie oben bereits erläutert, umfasst das Inspektionssystem 750 eine numerische Apertur 751b an der Ebene 752, wobei die numerische Apertur 751b größer als eine plane numerische Apertur (beispielsweise Bezugszeichen 701 in **Fig. 7A**) des korrespondierenden Lithografiesystems sein kann. Die zu inspizierende Probe S ist in der Ebene 752 platziert und wird von der Lichtquelle beleuchtet.

[0058] Das gemusterte Bild von der Probe S wird durch eine Sammlung von optischen Vergrößerungselementen 753 gelenkt, die das gemusterte Bild auf einen Sensor 754 projizieren. Geeignete Sensoren umfassen ladungsgekoppelte Bildsensoren (im Englischen „charged coupled devices“, abgekürzt mit „CCD“), CCD-Arrays, TDI-Sensoren („TDI“ ist die Abkürzung für „time delay integration“), TDI-Sensor-Arrays, Foto-Vervielfacher-Röhren (im Englischen „photomultiplier tubes“, abgekürzt mit „PMT“), und weitere Sensoren. In einem reflektierenden System würden optische Elemente die Probe beleuchten und das reflektierte Bild aufnehmen.

[0059] Die durch den Sensor 754 aufgenommenen Signale können durch ein Computersystem 773 oder, ganz allgemein, durch eine Signalverarbei-

tungs-Vorrichtung, verarbeitet werden, die einen Analog/Digital-Wandler umfassen kann, der zum Umwandeln analoger Signale aus dem Sensor 754 in digitale Signale für die Verarbeitung konfiguriert ist. Das Computersystem 773 kann konfiguriert sein, um die Intensität, Phase, und/oder andere bzw. weitere Eigenschaften des detektierten Lichtstrahls zu analysieren. Das Computersystem 773 kann konfiguriert sein (beispielsweise mit Programmieranleitungen), um ein User-Interface zur Verfügung zu stellen (beispielsweise auf einem Computer-Bildschirm) zum Anzeigen von resultierenden Testbildern und anderen bzw. weiteren Inspektionseigenschaften. Das Computersystem 773 kann auch eine oder mehrere Eingabe-Vorrichtungen umfassen (beispielsweise eine Tastatur, eine Maus, einen Joystick) zum Bereitstellen von Nutzereingaben, beispielsweise zum Ändern der Detektionsschwelle. Bei bestimmten Ausführungsformen ist das Computersystem 773 derart konfiguriert, dass es weiter unten detailliert beschriebene Inspektionstechniken ausführen kann. Das Computersystem 773 umfasst typischerweise einen oder mehrere mit Eingangs-/Ausgangs-Ports gekoppelte Prozessoren sowie einen oder mehrere Speicher via geeignete Sammelleitungen (Busse) oder andere Kommunikationsmechanismen.

[0060] Da solche Informations- und Programmieranweisungen auf einem speziell konfigurierten Computersystem implementiert werden können, umfasst solch ein System Programmieranweisungen / Computer-Code, um hierin beschriebene unterschiedliche Operationen auszuführen, die auf einem Computerlesbaren Medium gespeichert werden können. Beispiele für Maschinenlesbare Medien umfassen, sind jedoch nicht darauf beschränkt, magnetische Medien wie beispielsweise Festplatten, Disketten und Magnetbänder; optische Medien wie beispielsweise CD-ROM Datenträger; magneto-optische Medien wie beispielsweise optische Platten/Disketten; und Hardware-Vorrichtungen, die speziell dazu konfiguriert sind, Programmieranweisungen zu speichern und auszuführen, wie beispielsweise ROM-Speicher (read-only memory Vorrichtungen) und RAM-Speicher (random access memory). Beispiele für Programmieranweisungen umfassen sowohl Maschinencode, wie er beispielsweise durch einen Compiler erstellt wird, und Dateien, die Code in einer höheren Programmiersprache umfassen, der durch den Computer unter Verwendung eines Interpreters ausgeführt werden kann.

[0061] Bei bestimmten Ausführungsformen umfasst ein System zum Inspizieren einer Probe mindestens einen Speicher und mindestens einen Prozessor, die dazu konfiguriert sind, die folgenden Operationen auszuführen: Erzeugen von Intensitäts-Bildern mit einer Probe, wobei die Bilder ein transmittiertes Testbild und/oder ein reflektiertes Testbild umfassen, und

Analysieren der Intensitäts-Bilder des Tests basierend auf einem Referenzbild (von einer abgebildeten Probe oder von einer Design-Datenbank), um Defekte zu identifizieren.

[0062] Die oben beschriebenen Zeichnungen und die Beschreibung sind nicht als Beschränkung auf die spezifischen Komponenten des Systems aufzufassen und das System kann in vielen anderen Ausführungen ausgestaltet werden. Zum Beispiel kann das Inspektions- oder Mess-Werkezeug jede Anzahl geeigneter und bekannter Abbildungs- oder Metrologie-Werkezeuge sein, die angeordnet sind, um die kritischen Aspekte von Masken- oder Wafer-Merkmalen aufzulösen. Beispielsweise kann eine Inspektions- oder Messmaschine für abbildende Hellfeld-Mikroskopie, abbildende Dunkelfeld-Mikroskopie, abbildende Mikroskopie mit großem Bildfeld (full sky), Phasenkontrast-Mikroskopie, Polarisationskontrast-Mikroskopie und/oder Kohärenz-Proben-Mikroskopie angepasst sein. Es können auch Einzel- und Mehrbildverfahren verwendet werden, um Bilder des Ziels aufzunehmen. Diese Verfahren umfassen, zum Beispiel, einfache Erfassung, doppelte Erfassung, Kohärenz-Proben-Mikroskopie (CPM) mit einfacher Erfassung und CPM mit doppelter Erfassung. Optische Nicht-Abbildungs-Verfahren, beispielsweise Scatterometrie, können ebenfalls erwogen werden.

[0063] Obwohl die Erfindung in gewissem Detail für das Verständnis beschrieben wurde, ist es selbstverständlich, dass Änderungen oder Modifikationen gemacht werden können, die innerhalb des Schutzbereichs der nachstehenden Ansprüche liegen. Es soll bemerkt werden, dass es viele alternative Wege zur Implementierung der Prozesse, Systeme und Vorrichtungen der vorliegenden Erfindung gibt. Folglich sind die gegenwärtigen Ausführungsformen als illustrative Beispiele zu betrachten und nicht beschränkend. Die Erfindung ist nicht auf die hier dargestellten Details beschränkt.

Patentansprüche

1. Eine Laser-Vorrichtung (300) zum Erzeugen einer kohärenten Dauerstrich-(cw)-Ausgangsstrahlung (310) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, umfassend:
eine Kammer (204, 304) zum Aufnehmen mindestens eines Edelgases oder von Edelgasgemischen; eine Pumplaserquelle (102) zum Erzeugen mindestens eines CW-Pumplaserstrahls (203) der in die Kammer (204) zum Erzeugen mindestens eines mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208, 302), das Excimer-Emissionen aufweist, in der Kammer (204, 304) fokussiert ist; und
eine optische Kavität, die zum Ausbilden eines konfokalen oder instabilen Resonators innerhalb der Kammer (304) vorgesehen ist, um eine Rückkopp-

lung an die Excimer-Emissionen des mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (302) bereitzustellen, zum Erzeugen mindestens eines Dauerstrich-(cw)-Lasers (310) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, wobei das mindestens eine mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltene Plasma (302) eine Form eines Zylinders oder Stifts hat, wobei die optische Kavität umfasst:

(i) einen ersten Spiegel (306a), der aus Materialien geformt ist, die Wellenlängen größer oder gleich der Wellenlänge des CW-Pumplasers übertragen und eine hohe Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die zumindest einen Abschnitt eines Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, und
(ii) einen zweiten Spiegel (306b), der aus Materialien geformt ist, die eine Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die mindestens einen Abschnitt des Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Pumplaserquelle (102) eine Vielzahl von Faserbündeln (401a, 401b, 502) von inkohärenten Dioden oder eine Vielzahl von Faserbündeln von Yb-basierten aktiven Medien ist.

2. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die Kammer (204, 304) zum Aufnehmen und Halten des Edelgases oder der Edelgasgemische bei einem Druck von mehr als 10 bar konfiguriert ist.

3. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei das Edelgas oder das Edelgasgemisch eines oder mehrerer der folgenden Gase umfasst: Xe, Kr oder Ar.

4. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die Laser-Vorrichtung (300) zudem ein Lasermedium umfasst, das in der optischen Kavität angeordnet ist, wobei das Lasermedium derart angeordnet ist, dass angeregte Excimer-Zustände verwendet werden, um mittels Stößen Energie auf angeregte atomare Zustände zu übertragen, um den CW-Laser (310) aus dem Lasermedium zu generieren.

5. Die Laser-Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der CW-Laser (310) eine Wellenlänge im Ultraviolett (UV) oder Vakuum-UV aufweist.

6. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die Pumplaserquelle (102) eine Wellenlänge von 0,8 bis 0,9 μm oder größer oder gleich 1 μm und eine Durchschnittsleistung von größer oder gleich 1 kW aufweist.

7. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei das Edelgas mindestens einen relativen Fülldruck von 51% im Vergleich mit etwaigen heterodimerischen Gasen in der Kammer (204, 304) aufweist.

8. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, umfassend zudem eine Pumpe (212) zum Durchströmen des Edelgases oder der Edelgasgemische durch die Kammer (204).

9. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die Pumplaserquelle (102) und die optische Kavität angeordnet sind, um Excimer-Emissionen in dem mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasma (208, 302) durch eine kleine Signal-Verstärkung im Einfachdurchgang von mindestens 0,2 zu erzeugen, so dass jedes durch die Excimer-Emission zwischen dem ersten (306a) und dem zweiten Spiegel (306b) erzeugte Photon die Erzeugung von mindestens zwei Photonen bewirkt.

10. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 9, wobei die Verstärkung darauf basiert, dass eine Konzentrationsanzahl einer angeregten Population multipliziert mit einem Emissions-Wirkungsquerschnitt multipliziert mit einer Länge der optischen Kavität und des aktiven Lasermediums in einem Bereich über 2 liegt.

11. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die optische Kavität eine Länge zwischen 1 mm und 10 cm und einen Durchmesser von 100 µm bis 3 mm aufweist.

12. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 1, wobei die optische Kavität ein oder mehrere Elemente (316) zum Verringern der Bandbreite umfasst.

13. Ein Inspektionssystem (750) zum Inspizieren einer fotolithografischen Maske oder eines Wafers auf Defekte, umfassend:
eine Laser-Vorrichtung (760) gemäß Anspruch 1;
eine Abbildungsoptik zum Lenken des Ausgangsstrahls in Richtung einer Maske oder eines Wafers;
einen Detektor (754) zum Aufnehmen eines detektierten Signals oder Bilds als Antwort auf den Ausgangsstrahl, der durch die Maske oder den Wafer reflektiert, transmittiert oder gestreut wird; und
einen Prozessor und einen Speicher, die dazu konfiguriert sind, das detektierte Signal oder Bild zu analysieren, um dadurch Defekte auf der Maske oder dem Wafer zu detektieren.

14. Ein Fotolithographiesystem (700) zum Übertragen eines Musters von einer Maske (M) auf einen Wafer (W), umfassend:
eine Laser-Vorrichtung (703) nach Anspruch 1; und
eine Abbildungsoptik (753) zum Lenken des Ausgangsstrahls durch eine Maske auf einen Wafer.

15. Eine Laser-Vorrichtung (300) zum Erzeugen einer kohärenten Dauerstrich-(cw)-Ausgangsstrahlung (310) mit einer Wellenlänge von weniger als

200 nm, umfassend:

eine erste Kammer (204) zum Aufnehmen mindestens eines Edelgases oder von Edelgasgemischen;
eine Pumplaserquelle (102) zum Erzeugen mindestens eines CW-Pumplaserstrahls (203), der in die erste Kammer (204) zum Erzeugen mindestens eines mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208), das Excimer-Emissionen aufweist, in der ersten Kammer (204) fokussiert ist;

eine optische Kavität in einer zweiten Kammer (304) zum Empfangen eines gepressten Teils (302) des mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208), die zum Ausbilden eines konfokalen oder instabilen Resonators innerhalb der zweiten Kammer (304) vorgesehen ist, um eine Rückkopplung an die Excimer-Emissionen des mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208, 302) bereitzustellen, zum Erzeugen mindestens eines Dauerstrich-(cw)-Lasers (310) mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, wobei das mindestens eine mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltene Plasma (302) eine Form eines Zylinders oder Stifts hat, und wobei die zweite Kammer (304) einen Durchgang (314) hat, wobei die erste Kammer (204) so konfiguriert ist, dass sie einen ersten Druck hat, und die zweite Kammer (304) so konfiguriert ist, dass sie einen zweiten Druck hat, der deutlich niedriger als der erste Druck ist, um ein Pressen eines gepressten Teils (302) des mindestens einen mit dem CW-Pumplaserstrahl (203) aufrechterhaltenen Plasmas (208) aus der ersten Kammer (204) durch den Durchgang (314) zur zweiten Kammer (304) zu bewirken.

16. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 15, wobei der erste Druck mehr als 10 bar und der zweite Druck weniger als 1,33 mbar beträgt, wobei der Durchgang (314) einen Durchmesser von 30 bis 200 µm aufweist.

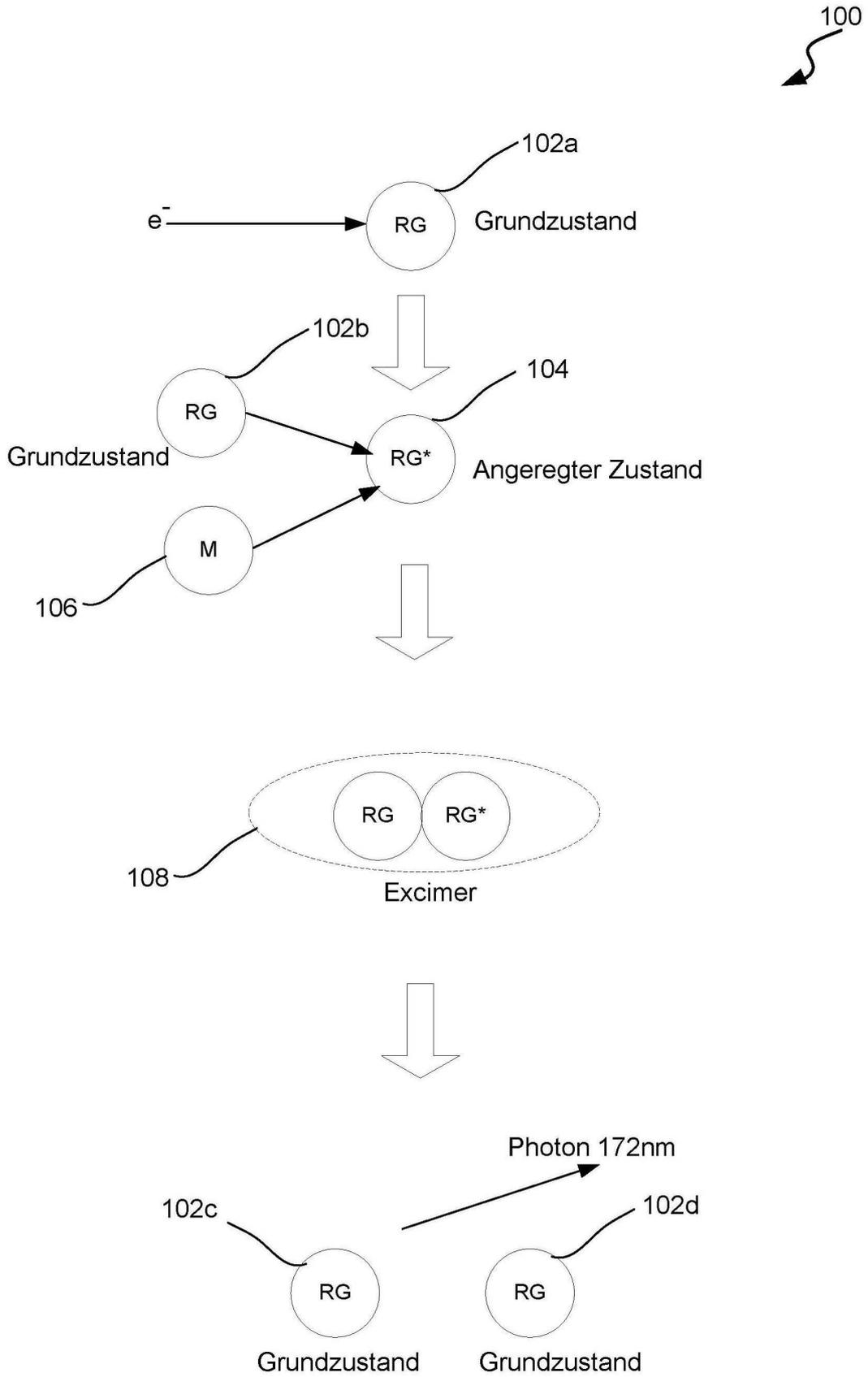
17. Die Laser-Vorrichtung (300) nach Anspruch 15, wobei die Pumplaserquelle (102) eine Vielzahl von Faserbündeln (401a, 401 b) zum Erzeugen einer Vielzahl von CW-Lasern (402a, 402b) umfasst, um eine Vielzahl von CW-Lasern aufrecht erhaltenen Mikroplasmen (404a, 404b) auszubilden, die entlang der Länge der optischen Kavität ausgerichtet sind.

18. Ein Verfahren zum Erzeugen einer Ausgangsstrahlung mit einer Wellenlänge von weniger als 200 nm, umfassend:
Aufnehmen eines Edelgases oder einer Edelgasmischung in einer ersten Kammer;
Erzeugen, mittels einer Pumplaserquelle, mindestens eines CW-Laser aufrechterhaltenen Plasmas, um Excimer-Emissionen innerhalb einer optischen Kavität zu erzeugen, die einen konfokalen oder

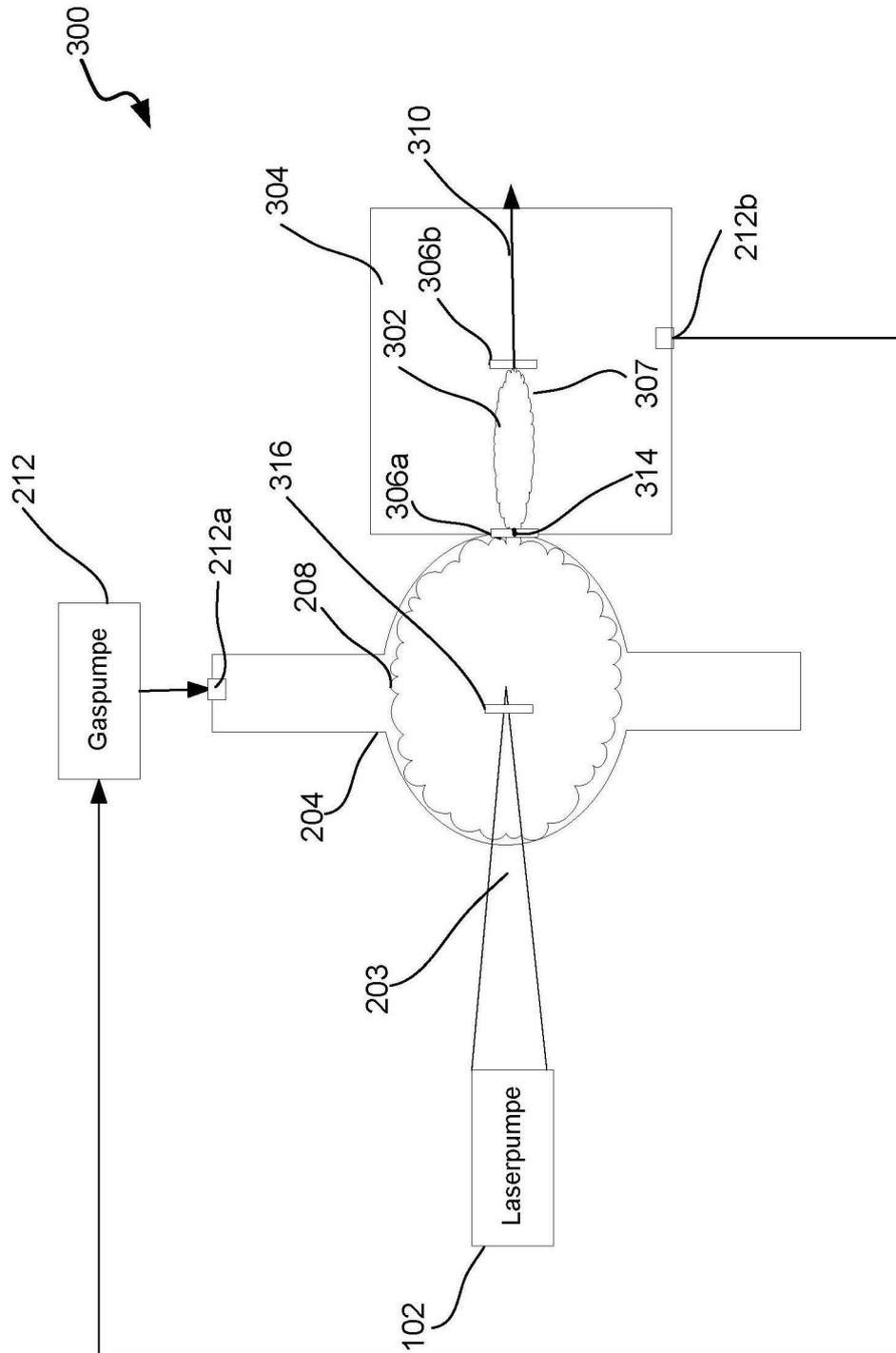
instabilen Resonator innerhalb der ersten Kammer bildet, um eine Rückkopplung an die Excimer-Emissionen bereitzustellen, wobei die optische Kavität innerhalb der Kammer angeordnet ist;
Ausgeben eines Excimerlasers aus der optischen Kavität basierend auf den Excimer-Emissionen und der Rückkopplung von der optischen Kavität;
Lenken des Excimerlasers in Richtung einer Halbleiterprobe; und
Inspizieren der Halbleiterprobe basierend auf dem Ausgangslicht, das von der Halbleiterprobe als Antwort auf den Excimerlaser auf der Halbleiterprobe reflektiert oder gestreut wird,
wobei das mindestens eine CW-Laser aufrechterhaltene Plasma eine Form eines Zylinders oder Stifts hat, wobei die optische Kavität umfasst:
(i) einen ersten Spiegel, der aus Materialien geformt ist, die Wellenlängen größer oder gleich der Wellenlänge des CW-Pumplasers übertragen und eine hohe Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die zumindest einen Abschnitt eines Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, und
(ii) einen zweiten Spiegel, der aus Materialien geformt ist, die eine Reflektivität bei Wellenlängen aufweisen, die mindestens einen Abschnitt des Wellenlängenbereichs der Excimer-Emissionen umfassen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Pumplaserquelle eine Vielzahl von Faserbündeln von inkohärenten Dioden oder eine Vielzahl von Faserbündeln von Yb-basierten aktiven Medien ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Figur 1



Figur 3

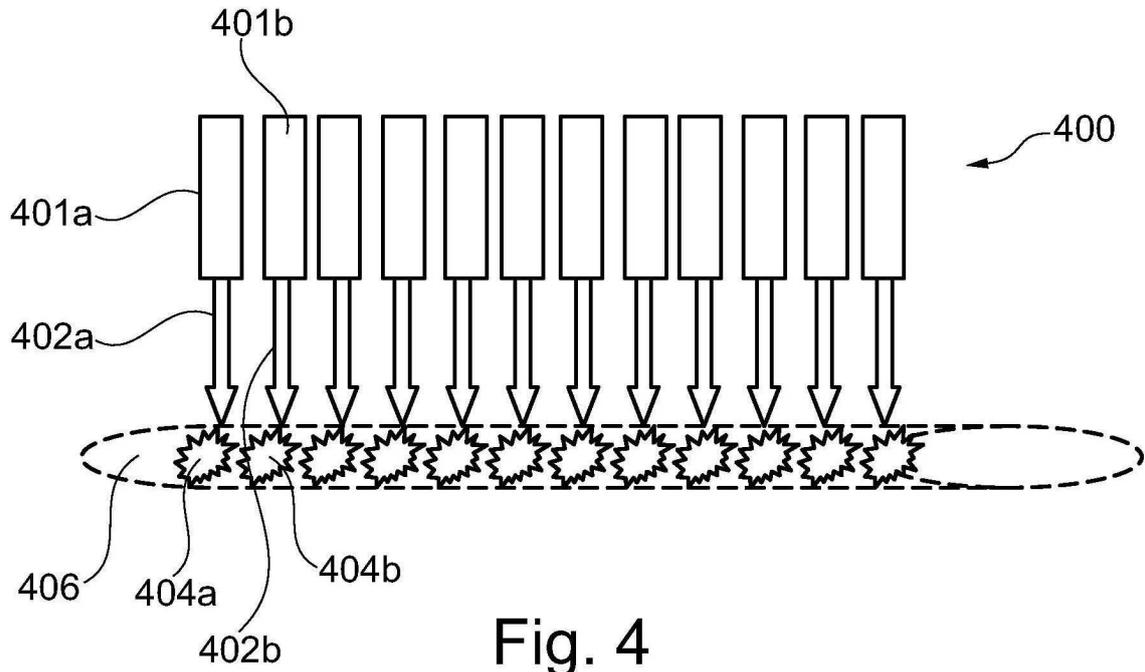


Fig. 4

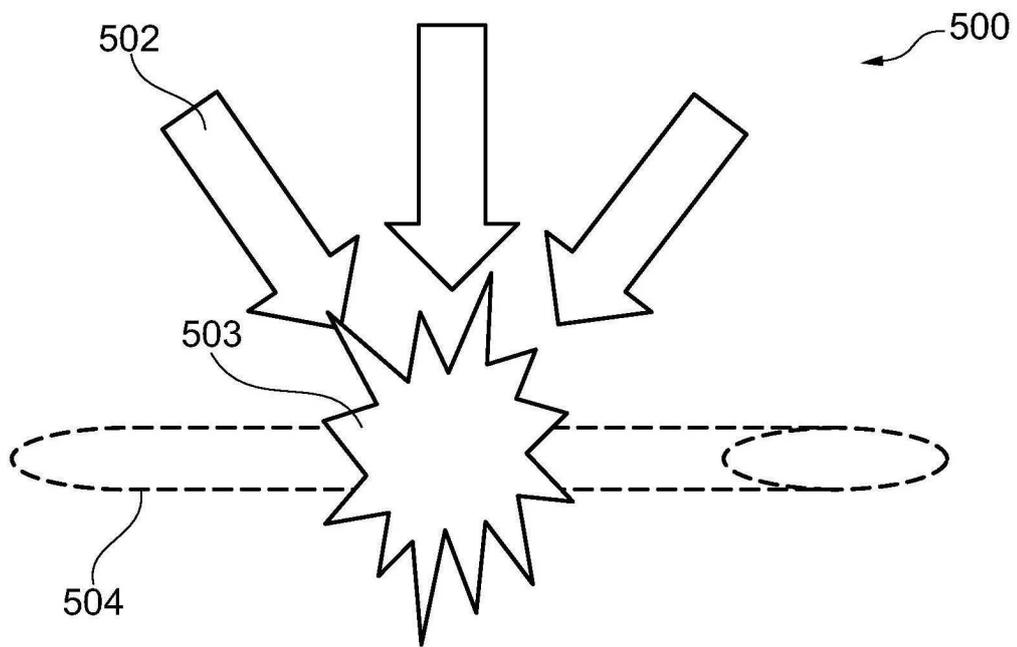
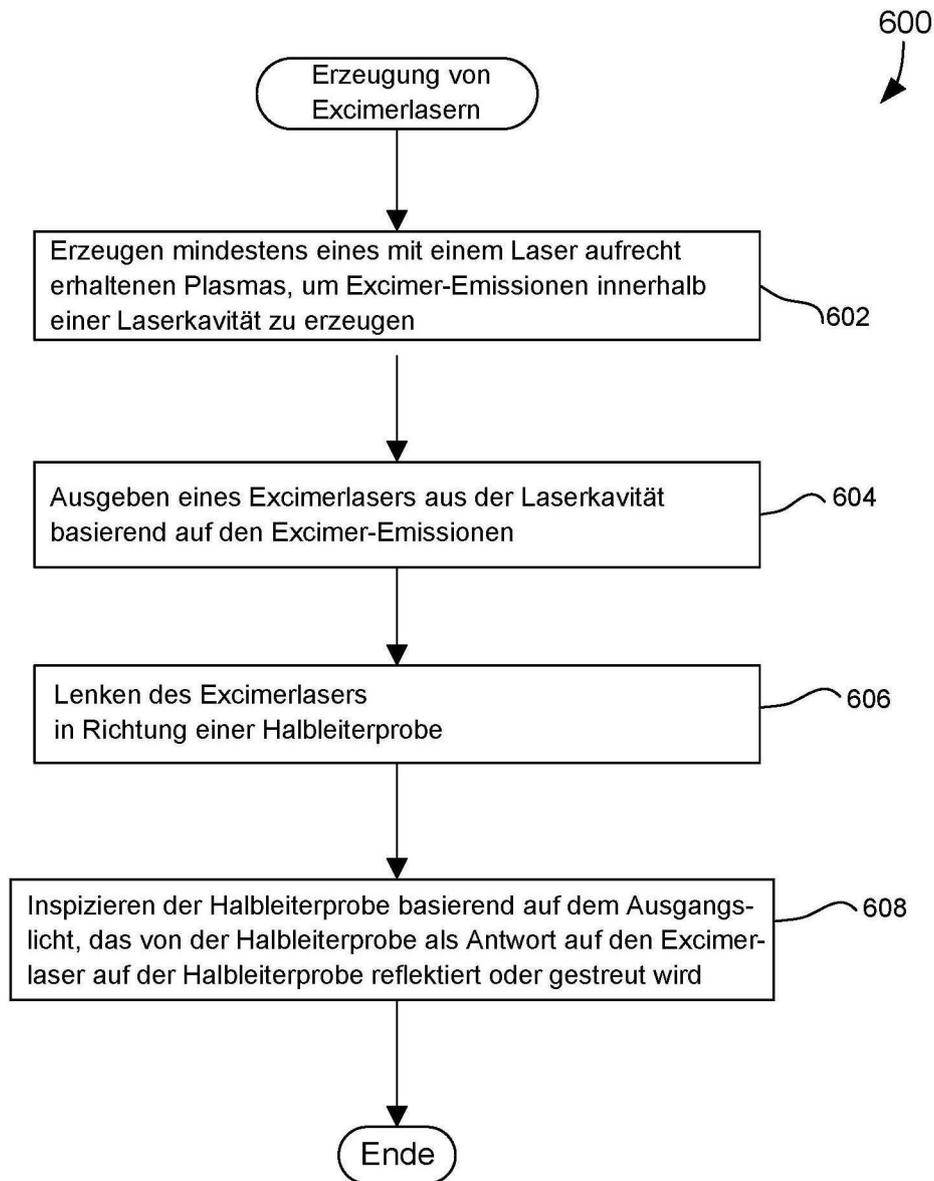
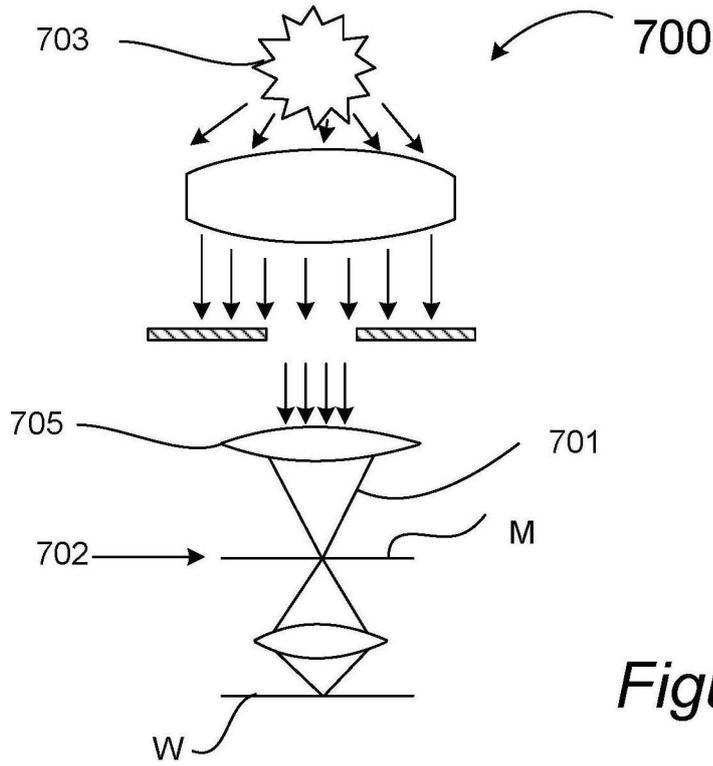


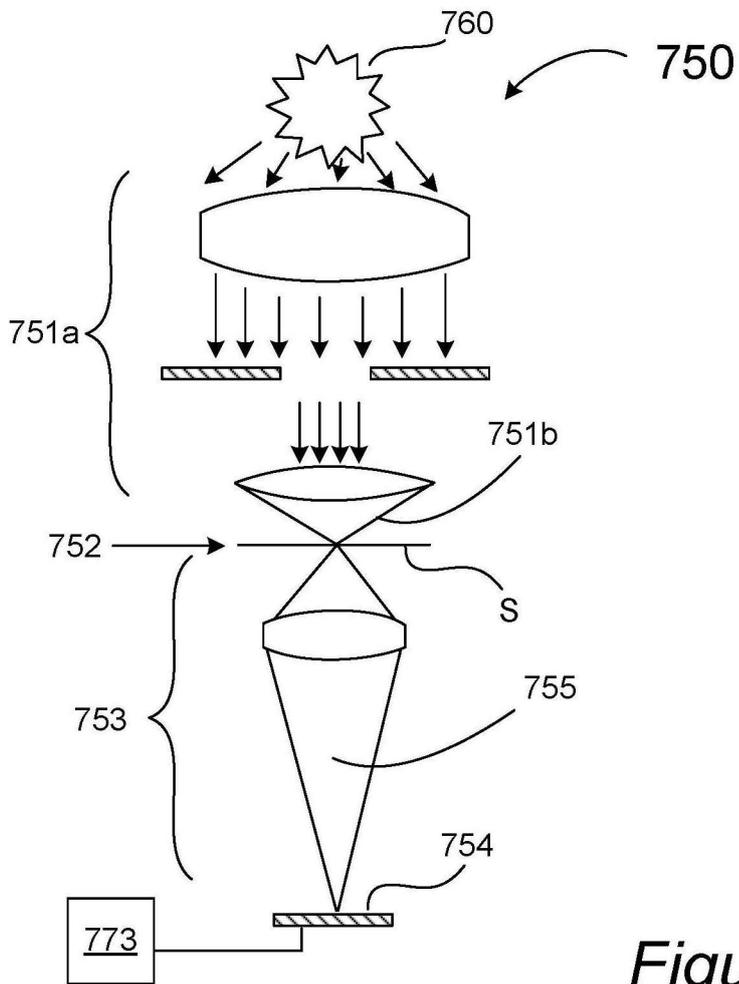
Fig. 5



Figur 6



Figur 7A



Figur 7B