



(10) **DE 11 2012 004 608 B4** 2023.01.05

(12)

## Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2012 004 608.0**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2012/059991**  
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2013/066600**  
(86) PCT-Anmeldetag: **12.10.2012**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **10.05.2013**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **14.08.2014**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **05.01.2023**

(51) Int Cl.: **H01L 21/268** (2006.01)  
**H01L 21/324** (2006.01)  
**B23K 26/064** (2014.01)

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:

**61/555,938**      **04.11.2011**      **US**  
**13/649,028**      **10.10.2012**      **US**

(62) Teilung in:  
**11 2012 007 374.6**

(73) Patentinhaber:  
**Applied Materials, Inc., Santa Clara, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Zimmermann & Partner Patentanwälte mbB, 80331 München, DE**

(72) Erfinder:  
**Holmgren, Douglas E., Portland, Oreg., US;**  
**Howells, Samuel C., Portland, Oreg., US**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **Optischer Aufbau zur Linienherzeugung unter Verwendung eines Mikrolinsenarrays**

(57) Hauptanspruch: Wärmebearbeitungsvorrichtung (2) zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats (22), Folgendes umfassend:

eine Substrathalterung;  
eine Laserstrahlungsquelle (202) zum Emittieren von Laserstrahlung entlang eines optischen Pfads (200);  
eine entlang des optischen Pfads (200) angeordnete Beleuchtungsoptik (204), die aufweist:

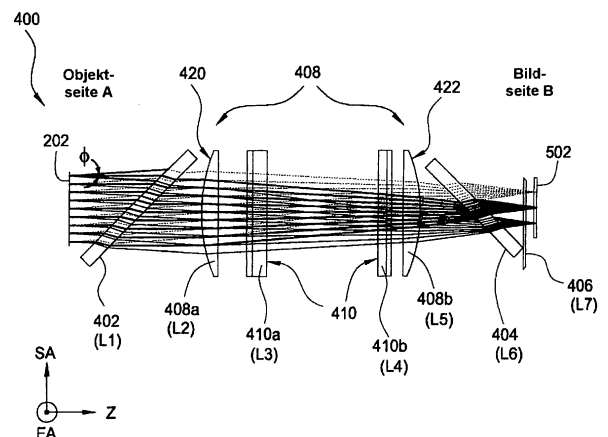
einen Satz einer langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (408a) und einer zweiten Zylinderlinse (408b), die voneinander beabstandet sind; und

einen Satz einer schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (410a) und einer zweiten Zylinderlinse (410b), die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) zwischen der ersten Zylinderlinse (408a) und der zweiten Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) angeordnet ist; und

einen Homogenisierer (206), der zwischen der Beleuchtungsoptik (204) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet ist, wobei der Homogenisierer (206) umfasst:

ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray (502); und  
ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray (504), wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray (504) eine rela-

tiv größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502), und Mikrolinsenachsen des ersten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (502) und Mikrolinsenachsen des zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (504) entlang einer Achse ausgerichtet sind, die parallel zu einer schnellen Achse der Laserstrahlungsquelle ist.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

<b>US</b>	<b>2003 / 0 058 916</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2006 / 0 222 041</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2010 / 0 297 856</b>	<b>A1</b>

**Beschreibung****HINTERGRUND****Gebiet der Erfindung**

**[0001]** Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beziehen sich generell auf eine Wärmebearbeitung von Halbleitersubstraten. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf eine Laserwärmebearbeitung von Halbleitersubstraten.

**Beschreibung des verwandten Stands der Technik**

**[0002]** Eine Wärmebearbeitung ist bei der Fertigung von Silicium- und anderen integrierten Halbleiterschaltungen erforderlich, die in Siliciumwafern oder anderen Substraten wie etwa Glasplatten für Anzeigen ausgebildet werden. Die erforderlichen Temperaturen können von relativ geringen Temperaturen von weniger als 250 °C bis über 1000 °C, 1200 °C oder sogar 1400 °C reichen, und können für eine Vielfalt von Prozessen wie etwa Dotiermittelimplantationstempern, Kristallisation, Oxidierung, Nitrierung, Silizidierung und chemisches Aufdampfen sowie andere Prozesse eingesetzt werden.

**[0003]** Aus der US 2003 / 0 058 916 A1 ist in diesem Zusammenhang eine Methode zum Bestrahlen von Halbleiter mit Laserlicht bekannt. In der US 2006 / 0 222 041 A1 ist ein Homogenisierer beschrieben, der geeignet ist, einen Laserstrahl zur Behandlung von Oberflächen zu homogenisieren. In der US 2010 / 0 297 856 A1 wird allgemein auf die thermische Oberflächenbehandlung von Halbleiterelementen eingegangen.

**[0004]** Für die sehr flachen Schaltungsmerkmale, die für fortschrittliche integrierte Schaltungen vonnöten sind, ist es wünschenswert, die Gesamtwärmebilanz beim Erzielen der erforderlichen Wärmebearbeitung zu reduzieren. Die Wärmebilanz kann als die Gesamtzeit bei hohen Temperaturen angesehen werden, die zum Erzielen der gewünschten Bearbeitungstemperatur erforderlich ist. Die Zeit, die der Wafer auf der höchsten Temperatur verbleiben muss, kann sehr kurz sein. Beispielweise verwendet die schnelle Wärmebearbeitung (RTP - rapid thermal processing) Strahlungslampen, die sehr schnell ein- und ausgeschaltet werden können, um nur den Wafer und nicht den Rest der Kammer zu erwärmen. Gepulstes Lasertempn unter Verwendung sehr kurzer (ca. 20 ns) Laserimpulse ist beim Erwärmen nur der Oberflächenschicht und nicht des darunterliegenden Wafers effektiv, womit sehr kurze Anstiegs- und Abstiegsraten ermöglicht werden.

**[0005]** Ein vor Kürzerem in verschiedenen Formen entwickelter Ansatz, der manchmal als Wärmeflusslasertempn oder dynamisches Oberflächentempn (DSA - dynamic surface annealing) bezeichnet wird, verwendet ein konisch zulaufendes Lichtrohr und eine anamorphe Abbildungsoptik, um sehr starke Lichtstrahlen zu erzeugen, die auf den Wafer als eine dünne, lange Strahlungsline auftreffen. Die Linie wird dann über der Oberfläche des Wafers in einer Richtung senkrecht zur langen Dimension des Linienstrahls gescannt. Es wurde jedoch berichtet, dass das Lichtrohr, das zum Homogenisieren und Skalieren des Bilds entlang der langsamen Achse (Slow Axis) (d.h. der Längenrichtung) verwendet wird, fragil ist, schwierig herzustellen ist und einer Fehlausrichtung zur weiteren Optik im System unterliegt.

**[0006]** Deshalb besteht ein Bedarf an einem effizienteren und wirtschaftlicheren optischen System, um ein Laserlinienbild zu projizieren, das weniger anfällig für Ausrichtungsfehler und weniger fragil ist.

**ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG**

**[0007]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich generell auf eine Wärmebearbeitung von Halbleitersubstraten. In einer Ausführungsform wird eine Wärmebearbeitungsvorrichtung zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats bereitgestellt. Die Vorrichtung umfasst eine Substrathalterung, eine Laserstrahlungsquelle, die Laserstrahlung entlang eines optischen Pfads zwischen der Laserstrahlungsquelle und der Substrathalterung emittiert, eine entlang des optischen Pfads angeordnete Beleuchtungsoptik, die einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse, die voneinander beabstandet sind, und einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse umfasst, die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen zwischen der ersten Zylinderlinse und der zweiten Zylinderlinse des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen angeordnet ist, einen Homogenisierer, der zwischen der Beleuchtungsoptik und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, um Laserstrahlung

aus der Laserstrahlungsquelle zu homogenisieren, wobei der Homogenisierer ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen und ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen umfasst, wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen eine relativ größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen. Die Mikrolinsenachsen des ersten mikrooptischen Mikrolinsenarrays und Mikrolinsenachsen des zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarrays sind entlang einer Achse ausgerichtet, die parallel zu einer schnellen Achse der Laserstrahlungsquelle ist. Die Vorrichtung umfasst ferner mehrere Kondensorlinsen, die zwischen dem Homogenisierer und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads vorgesehen sind, um ein Linienbild auf eine Oberfläche des Substrats zu fokussieren, wobei die mehreren Kondensorlinsen über mindestens fünf Linsen mit sphärischen Oberflächen verfügen.

**[0008]** In einer anderen Ausführungsform wird eine Wärmebearbeitungsvorrichtung zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats bereitgestellt. Die Vorrichtung umfasst eine Substrathalterung, ein Array aus Laserdiodenbarren, die Laserstrahlung mit einer ersten Wellenlänge emittieren, wobei das Array aus Laserdiodenbarren in mehreren parallelen Reihen angeordnet ist, die sich entlang einer langsamen Achse erstrecken, wobei die Reihen von Laserdiodenbarren in einem Stapel entlang einer schnellen Achse angeordnet sind, wobei die langsame Achse und die schnelle Achse orthogonal zu einem optischen Pfad zwischen dem Laserdiodenbarrenarray und der Substrathalterung sind, eine Beleuchtungsoptik, die zwischen dem Laserdiodenbarrenarray und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, wobei die Beleuchtungsoptik einen polarisierenden Strahlteiler umfasst, einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse, die voneinander beabstandet sind, einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse, die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen zwischen der ersten Zylinderlinse und der zweiten Zylinderlinse des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen angeordnet ist, einen dichroitischen Spiegel, der dem Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen nachgeordnet vorgesehen und dazu ausgelegt ist, vom erwärmten Substrat reflektierte Laserstrahlung mit einer zweiten und einer dritten Wellenlänge zu einem Pyrometer umzuleiten, und eine Wellenplatte, die dem dichroitischen Spiegel nachgeordnet vorgesehen ist, um die lineare Polarisierung von Laserstrahlung in eine zirkuläre Polarisierung zu transformieren, einen Homogenisierer, der zwischen der Beleuchtungsoptik und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, um Laserstrahlung entlang der langsamen Achse zu homogenisieren, wobei der Homogenisierer ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen und ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen umfasst, wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen eine relativ größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen, und einen Kondensorlinsensatz, der zwischen dem Homogenisierer und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, um ein Linienbild auf eine Oberfläche des Substrats zu fokussieren, wobei der Kondensorlinsensatz über mindestens fünf Linsen mit sphärischen Oberflächen verfügt.

**[0009]** In noch einer anderen Ausführungsform wird eine Wärmebearbeitungsvorrichtung zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats bereitgestellt. Die Vorrichtung umfasst eine Substrathalterung, ein Array aus Laserdiodenbarren, die in mehreren parallelen Reihen angeordnet sind, die sich entlang einer langsamen Achse erstrecken, wobei die Reihen von Laserdiodenbarren in einem Stapel entlang einer schnellen Achse angeordnet sind, wobei die langsame Achse allgemein senkrecht zur schnellen Achse ist, eine Beleuchtungsoptik, die zwischen dem Laserdiodenbarrenarray und der Substrathalterung angeordnet ist, wobei die Beleuchtungsoptik einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse, die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen Laserstrahlung in der langsamen Achse kollimiert, und einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen mit mindestens einer ersten Zylinderlinse und einer zweiten Zylinderlinse umfasst, die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen zwischen der ersten und zweiten Zylinderlinse des Satzes der langsamen Linse zugeordneter Linsen angeordnet ist, um Laserstrahlung in der schnellen Achse zu kollimieren, und einen Homogenisierer, der zwischen der Beleuchtungsoptik und der Substrathalterung angeordnet ist, um von der Beleuchtungsoptik kollimierte Laserstrahlung entlang der langsamen Achse zu homogenisieren, wobei der Homogenisierer ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen und ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen umfasst, die parallel zum und beabstandet vom ersten mikrooptischen Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen angeordnet sind, wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen eine relativ größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen, und einen Kondensorlinsensatz, der zwischen dem Homogenisierer und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, um ein Linienbild auf eine Oberfläche des Substrats zu fokussieren, wobei der Kondensorlinsensatz über mindestens fünf Linsen mit sphärischen Oberflächen verfügt.

## Figurenliste

**[0010]** Um die Art und Weise nachzuvollziehen, auf die sich die vorstehend angeführten Merkmale der vorliegenden Erfindung im Detail verstehen lassen, kann auf eine eingehendere Beschreibung der vorstehend kurz zusammengefassten Erfindung durch Bezug auf Ausführungsformen zurückgegriffen werden, von denen einige in den beigefügten Zeichnungen dargestellt sind.

**Fig. 1** ist eine beispielhafte perspektivische Ansicht einer Wärmeflusslasertempervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

**Fig. 2** stellt konzeptionell ein optisches System mit einem Laserdiodenbarrenarray und einer Optik dar, die insgesamt so zusammenwirken, dass eine gleichmäßige Verteilung von auf einen Wafer zu leitenden Laserlicht hergestellt und fokussiert wird.

**Fig. 3** stellt eine Enddraufsicht auf das Laserdiodenbarrenarray dar.

Die **Fig. 4A** und **Fig. 4B** stellen der langsamen Achse und der schnellen Achse zugeordnete Ansichten von Ausgangsstrahlen dar, die sich durch eine beispielhafte Beleuchtungsoptik ausbreiten.

**Fig. 5A** stellt eine der langsamen Achse zugeordnete Ansicht des Mikrolinsenarray-Homogenisierers dar.

**Fig. 5B** stellt eine der langsamen Achse zugeordnete Nahansicht eines Teils des Mikrolinsenarrays des vorhomonisierenden Linsenarrays dar.

**Fig. 6A** stellt eine Ansicht der langsamen Achse von Laserstrahlen dar, die sich durch eine beispielhafte Fourier-Transformationslinse ausbreiten.

**Fig. 6B** stellt ein Verhältnis zwischen einer Verzerrungsfunktion und einer normalisierten Strahlungintensität  $I(\theta)$  sowie einer Bestrahlungsstärkenfunktion  $H(y)$  für eine Fourier-Transformationslinse dar.

**Fig. 7** stellt eine der langsamen Achse zugeordnete Ansicht einer Linsenanordnung eines optischen Systems dar, das ein Laserdiodenbarrenarray, eine Beleuchtungsoptik, einen Mikrolinsenarray-Homogenisierer, eine Fourier-Transformationslinse und eine Pyrometersammeloptik gemäß einer Ausführungsform der Erfindung umfasst.

## AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

**[0011]** **Fig. 1** ist eine beispielhafte perspektivische Ansicht einer Wärmeflusslasertempervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Vorrichtung 2 umfasst allgemein eine zum zweidimensionalen Verfahren bestimmte Brückenstruktur 10. Die Brückenstruktur 10 kann ein Paar feststehender, paralleler Schienen 12, 14 enthalten. Zwei parallele Brückenausleger 16, 18 sind in einem Sollabstand voneinander gemeinsam befestigt und auf den feststehenden Schienen 12, 14 gehalten, und werden durch einen (nicht gezeigten) Motor und einen (nicht gezeigten) Antriebsmechanismus gesteuert, um auf (nicht gezeigten) Rollen oder Kugellagern zusammen die feststehenden Schienen 12, 14 entlang zu gleiten. Eine Strahlquelle 20 ist gleitbeweglich an den Brückenauslegern 16, 18 gehalten und kann unter den Auslegern 16, 18 abgehängt sein, die durch nicht dargestellte Motoren und Antriebsmechanismen gesteuert werden, um entlang diesen zu gleiten. Ein Substrat, beispielsweise ein Siliciumwafer 22, kann ortsfest unter der Brückenstruktur 10 gelagert sein. Die Strahlquelle 20 umfasst allgemein, wie nachstehend noch ausführlicher beschrieben wird, eine Laserlichtquelle und -optik, um einen Strahl 24 zu erzeugen, der auf den Wafer 22 als ein Linienstrahl 26 auftrifft, der allgemein parallel zu den feststehenden Schienen 12, 14 verläuft, was im Nachstehenden als die langsame Richtung (d.h. die Linienlängenrichtung) bezeichnet wird.

**[0012]** Obwohl hier nicht dargestellt, kann die Brückenstruktur 10 darüber hinaus eine Z-Achsen-Bühne umfassen, um die Laserlichtquelle und -optik in einer zum fächerförmigen Strahl 24 im Allgemeinen parallelen Richtung zu bewegen, um dadurch den Abstand zwischen der Strahlquelle 20 und dem Wafer 22 kontrolliert zu verändern und damit die Fokussierung des Linienstrahls 26 auf den Wafer 22 zu steuern. Beispielhafte Abmessungen des Linienstrahls 26 umfassen eine Länge von ca. 5 mm bis ca. 1 cm, beispielsweise ca. 12 mm, und eine Breite von ca. 50  $\mu\text{m}$  bis ca. 90  $\mu\text{m}$ , beispielsweise ca. 75  $\mu\text{m}$ , bei einer beispielhaften Leistungsdichte von 220  $\text{kW}/\text{cm}^2$ . Alternativ können die Strahlquelle und die dazugehörige Optik ortsfest sein, während der Wafer auf einer Bühne (z.B. einer X-Y-Bühne) gelagert ist, die ihn in zwei Dimensionen verfährt.

**[0013]** In einer Ausführungsform können die Brückenausleger 16, 18 an einer bestimmten Stelle entlang der feststehenden Schienen 12, 14 angeordnet sein, und die Strahlquelle 20 wird mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit die Brückenausleger 16, 18 entlang bewegt, um den Linienstrahl 26 senkrecht zu seiner lan-

gen Dimension in einer Richtung zu verfahren, die als die schnelle Richtung (d.h. die Linienbreitenrichtung) bezeichnet wird. Alternativ kann die Strahlquelle 20 ortsfest sein, während der Wafer 22 im Hinblick auf die Strahlquelle 20 bewegt wird, wodurch der Linienstrahl 26 von einer Seite des Wafers 22 zur anderen verfahren wird, um einen 1 cm breiten Streifen des Wafers 22 zu beleuchten. Der Linienstrahl 26 ist schmal genug und die Verfahrensgeschwindigkeit in der schnellen Richtung schnell genug, dass ein bestimmter Bereich des Wafers vorübergehend der optischen Strahlung des Linienstrahls 26 ausgesetzt wird, aber die Stärke an der Spitze des Linienstrahls ausreicht, um den Oberflächenbereich auf sehr hohe Temperaturen zu erhitzen. Jedoch werden die tieferen Abschnitte des Wafers 22 nicht nennenswert erhitzt und wirken deshalb als Wärmesenke zum schnellen Abkühlen des Oberflächenbereichs. Sobald das schnelle Verfahren abgeschlossen ist, werden die Brückenausleger 16, 18 oder der Wafer 22, der von einer X-Y-Bühne bewegt wird, zu einer neuen Position derart bewegt, dass der Linienstrahl 26 entlang seiner langen Dimension bewegt wird, die entlang der langsamen Achse verläuft. Dann erfolgt wieder das schnelle Verfahren, um einen benachbarten Streifen des Wafers 22 zu beleuchten. Das abwechselnde schnelle und langsame Verfahren werden wiederholt, eventuell in einer Serpentinbahn der Strahlquelle 20, bis der gesamte Wafer 22 wärmebearbeitet wurde.

**[0014]** Eine beispielhafte Strahlquelle 20 ist in **Fig. 2** konzeptionell dargestellt, die ein optisches System 200 darstellt, das ein Laserdiodenbarrenarray und eine Optik umfasst, die insgesamt so zusammenwirken, dass eine gleichmäßige Verteilung von auf den Wafer 22 zu fokussierendem Laserlicht erzeugt wird. In einer Ausführungsform umfasst das optische System 200 allgemein ein Laserdiodenbarrenarray 202, eine Beleuchtungsoptik 204, einen Homogenisierer 206, bei dem es sich um ein Mikrolinsenarray handeln kann, eine Fourier-Transformationslinse (oder Feldlinse) 208 und eine Pyrometersammeloptik 210. Der Pfeil „A“ gibt an, dass Laserstrahlung mit ca. 808 nm vom Laserdiodenbarrenarray 202 erzeugt und der Reihe nach durch die Beleuchtungsoptik 204, den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206, die Fourier-Transformationslinse 208 und zum Wafer übertragen wird. Ein Teil der vom erwärmten Wafer abgegebenen Wärmestrahlung wird durch die Fourier-Transformationslinse 208 aufgefangen und geht durch den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206, die Beleuchtungsoptik 204 zurück zum Laserdiodenbarrenarray 202. Ein (nicht gezeigter) Strahlreflektor kann zwischen dem Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 und der Beleuchtungsoptik 204 angeordnet sein, um einen Teil einer Wärmestrahlung, die mit den Pyrometerwellenlängen (940 nm, 1550 nm, Pfeil „B“) vom erwärmten Wafer abgegeben wird, zur Pyrometersammeloptik 210 zu leiten, wodurch die Temperatur des in Wärmebearbeitung befindlichen Wafers überwacht wird. Um die Wärmeeinwirkung auf das Laserdiodenbarrenarray 202 zu vermeiden oder zu minimieren, kann die Beleuchtungsoptik 204 eine oder mehrere Strahlfalle/n (beam dumps) (nicht gezeigt) umfassen, um vom erwärmten Wafer reflektierte Wärmestrahlung aufzufangen. Das optische System 200 wird nachstehend noch ausführlicher erörtert.

**[0015]** **Fig. 3** stellt eine Enddraufsicht des Laserdiodenbarrenarrays 202 dar. Das Laserdiodenbarrenarray 202 kann über mehrere Diodenbarren 302 verfügen, wovon jeder eine gewünschte Anzahl an Laserdioden (nicht gezeigt), beispielsweise ca. 25 Laserdioden umfasst, die am Diodenbarren 302 angebracht und um einen Abstand von 400  $\mu\text{m}$  getrennt sind. Die Diodenbarren 302 können parallel zueinander angeordnet sein, wodurch ein Laserbarrenstapel 304 gebildet wird. Die Anzahl an Diodenbarren 302 und Stapel 304 können je nach der für den Prozess erforderlichen Ausgangsleistung variieren. In Fällen, in denen der Ausgangsbedarf mindestens 1600 W beträgt, der vom vollständigen Diodenbarrenarray erzielt werden kann, kann es vorteilhaft sein, die Gesamtleistung aus einem bestimmten Diodenbarren zu begrenzen, um die Nutzungsdauer der Laserdiode zu verlängern. Beispielsweise kann die Ausgangsleistung für jeden Diodenbarren 302 auf ca. 60 W beschränkt werden. In einer Ausführungsform, in der eine Teilung ca. 1,8 mm (Höhe) und eine Diodenbarrenlänge ca. 10 mm beträgt, ist die Leistungsdichte/Barren ca. 330  $\text{W}/\text{cm}^2$ . Um die geringere Lichtabgabe auszugleichen, wurde bestimmt, dass möglicherweise insgesamt 3 Stapel 304 (in Richtung der langsamen Achse) aus 9 Diodenbarren 302 (in Richtung der schnellen Achse) erforderlich sind, um den Gesamtleistungsbedarf zu erfüllen. Deshalb verfügt das Laserdiodenbarrenarray 202 über insgesamt 27 Diodenbarren 302, die wie gezeigt in einem 3x9-Array gruppiert sind.

**[0016]** Jeder Diodenbarren 302 entspricht im Allgemeinen einem p-n-Übergang, der dazu ausgelegt ist, einen Strahl mit einer für Wärmebearbeitungsanwendungen geeigneten Wellenlänge abzugeben, beispielsweise zwischen ca. 190 nm und ca. 950 nm, wobei eine spezielle Anwendung sich einer Beleuchtung mit 808 nm bedient. Wegen der Geometrie des Diodenbarrens 302 sind die aus jedem einzelnen Diodenbarren 302 ausgegebenen Rohstrahlen sehr divergierend und sowohl in der schnellen als auch langsamen Achse (die beide senkrecht zur Strahlrichtung sind) asymmetrisch. Eine typische Divergenz der schnellen Achse beträgt ca. 40° FWHM (volle Breite, halbes Maximum - Full Width Half Maximum), und eine Divergenz der langsamen Achse beträgt ca. 10° FWHM. Für die meisten Anwendungen kann es vorteilhaft sein, den Ausgangsstrahl unter Verwendung eines optischen Elements oder mehrerer optischer Elemente in einen Strahl

mit einem rechteckigen Querschnitt umzuformen. Wegen der in Richtung der schnellen Achse beobachteten höheren Divergenz kann ein optisches Element wie etwa eine (nicht gezeigte) Zylinderlinse jede Laserdiode bedecken, um Ausgangsstrahlen mit einem Divergenzwinkel  $\phi$  (eine Ansicht der langsamen Achse der Ausgangsstrahldivergenz  $\phi$  ist in **Fig. 4** gezeigt) in Richtung der schnellen Achse zu kollimieren. In einer Ausführungsform betragen Ausgangsstrahldivergenzen durch das optische System 200 entlang der langsamen Achse weniger als  $7,5^\circ$  FWHM (volle Breite, halbes Maximum - Full Width Half Maximum) und liegen bei allen Betriebsströmen entlang der schnellen Achse unter  $0,2^\circ$  FWHM.

**[0017]** In einer Ausführungsform kann der Diodenbarren 302 eine Länge von ca. 2 mm bis ca. 20 mm, beispielsweise ca. 10 mm in Richtung der langsamen Achse haben, und ist vom benachbarten Diodenbarren um einen Barrenabstand „p“ von ca. 0,5 mm bis ca. 3 mm, beispielsweise ca. 1,8 mm oder weniger in Richtung der schnellen Achse getrennt. Der Stapelabstand „d“ (von der Mitte des Stapels zur Mitte des Stapels) kann zwischen ca. 5 mm and ca. 25 mm, beispielsweise ca. 12 mm oder weniger betragen. Das Laserdiodenbarrenarray 202 kann eine Höhe „H“ (die durch die Anzahl von Barren und den Barrenstand festgelegt wird) von ca. 5 mm bis ca. 30 mm, beispielsweise ca. 14,4 mm, und eine Breite „W“ (die auch durch die Anzahl von Barren und den Barrenstand festgelegt wird) von ca. 15 mm bis ca. 50 mm, beispielsweise ca. 34 mm haben. Es ist vorgesehen, dass die Auslegung inklusive Abstand, Teilung und/oder Größe des Diodenbarrens 302 je nach dem Ausgangsleistungsbedarf variieren kann. Es wird davon ausgegangen, dass das Laserdiodenbarrenarray 202 mit dieser speziellen Geometrie einen optischen Strahl mit einem Seitenverhältnis bereitstellt, das günstig für eine Homogenisierung durch ein Array oder Arrays aus Mikrozyylinderlinsen und zum Abbilden einer Strahllinie unter Verwendung von Linsen mit sphärischen Oberflächen ist, wie nachstehend noch ausführlicher erörtert wird.

**[0018]** Die **Fig. 4A** und **Fig. 4B** zeigen Ansichten der langsamen Achse und schnellen Achse von Ausgangsstrahlen, die sich durch eine beispielhafte Beleuchtungsoptik 400 ausbreiten. Die Beleuchtungsoptik 400 kollimiert und kondensiert Ausgangsstrahlen aus dem Laserdiodenbarrenarray 202 mit einer richtigen Divergenz der langsamen Achse und numerischen Apertur (NA), wenn die Ausgangsstrahlen den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 erreichen. Die Beleuchtungsoptik 400 trägt auch dazu bei, die Abhängigkeit von Homogenisiererbeleuchtung mit Laserdiodenstrom zu eliminieren und eine konstante Winkelbeleuchtung der langsamen Achse des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 bereitzustellen. In einer Ausführungsform kann die Beleuchtungsoptik 400 einen polarisierenden Strahlteiler 402 (in der Zeichnung als „L1“ ausgewiesen), einen dichroitischen Pyrometerspiegel 404 (als „L6“ ausgewiesen), eine Wellenplatte 406 (als „L7“ ausgewiesen), einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen 408 (als „L2“ und „L5“ ausgewiesen) und einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen 410 (als „L3“ und „L4“ ausgewiesen) umfassen. Der polarisierende Strahlteiler 402 kann dem Laserdiodenbarrenarray 202 nachgeordnet vorgesehen und dazu ausgelegt sein, eine oder beide Komponenten zu erzeugen, die orthogonale Polarisierungsrichtungen haben. Der polarisierende Strahlteiler 402 ist dazu ausgelegt, sicherzustellen, dass die Ausgangsstrahlen aus dem Laserdiodenbarrenarray 202 den polarisierenden Strahlteiler 402 mit einer festgelegten linearen Polarisierung erreichen, die den Ausgangsstrahl entlang der optischen Achse Z (dem optischen Pfad) übertragen wird, und Licht, das nicht von der festgelegten linearen Polarisierung ist, aus dem optischen Pfad zu einer (nicht gezeigten) Strahlfalle umgeleitet wird. In einem Beispiel ist der polarisierende Strahlteiler 402 in einem Winkel von ca.  $45^\circ$  Grad im Hinblick auf die langsame Achse positioniert. Die Wellenplatte 406, wie etwa eine Viertel- $(\lambda/4)$ -Wellenplatte kann im Strahlpfad etwa an einer Stelle zwischen dem polarisierenden Strahlteiler 402 und dem Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 so angeordnet sein, dass der linear polarisierte Strahl, der durch die Wellenplatte 406 hindurchgeht, zirkular polarisiert wird. In einem Beispiel ist die Wellenplatte 406 zwischen dem dichroitischen Pyrometerspiegel 404 und dem Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 angeordnet.

**[0019]** Nachdem der polarisierte Strahl den Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen 408, den Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen 410, den dichroitischen Pyrometerspiegel 404, die Wellenplatte 406 und den Rest des optischen Systems 200 (d.h. den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 und die Fourier-Transformationslinse 208, wie in **Fig. 2** gezeigt) durchquert hat, kann ein Teil des Strahls von der Oberfläche des Wafers 22 durch das optische System 200 zurück gestrahlt werden. Während einer solchen Rückübertragung bewirkt das zweite Zusammentreffen des Strahls mit der Wellenplatte 406, dass der Strahl wieder linear polarisiert, aber um  $90^\circ$  gedreht wird. Nach ihrem zweiten Zusammentreffen mit dem polarisierenden Strahlteiler 402 wird die Laserstrahlung zur Strahlfalle geleitet, wodurch das Laserdiodenbarrenarray 202 vor potentielltem Schaden geschützt wird.

**[0020]** Vom erwärmten Wafer 22 abgegebene Wärmestrahlung mit einer Wellenlänge von 950 nm oder darüber wird durch den dichroitischen Pyrometerspiegel 404 zu einem Pyrometer (**Fig. 7**) umgeleitet. Der Ausgang des Pyrometers wird an ein (nicht gezeigtes) Steuergerät geliefert, das den erfassten Fotostrom in eine

Wafertemperatur umsetzt und sie mit einer gewünschten Temperatur vergleicht und dabei die dem Laserdiodenbarrenarray 202 zugeführte Energie einstellt (wie später noch ausführlich erörtert wird).

**[0021]** Der Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen 408 kann, in der Reihenfolge ausgehend von einer Objektseite A zu einer Bildseite B, eine Zylinderlinse 408a und eine Zylinderlinse 408b, die voneinander beabstandet sind, mit einer effektiven Brennweite  $f$  von ca. 120 mm umfassen. Der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen 410 ist zwischen den Zylinderlinsen 408a, 408b angeordnet und kann, in der Reihenfolge ausgehend von einer Objektseite A zu einer Bildseite B, eine Zylinderlinse 410a und eine Zylinderlinse 410b umfassen, die voneinander beabstandet sind, um ein Fokalteleskop oder einen Strahlexpander mit einer 1:1,8maligen Vergrößerung in Richtung der schnellen Achse zu enthalten. In einer Ausführungsform haben die Zylinderlinsen 408a eine konvexe Linsenoberfläche 420, die zur Objektseite A gewandt ist, während die Zylinderlinsen 408b eine konvexe Linsenoberfläche 422 haben, die zur Bildseite B gewandt ist. Die Zylinderlinse 410a hat eine konkave Linsenoberfläche 426, die zur Bildseite A gewandt ist, während die Zylinderlinse 410b eine konvexe Linsenoberfläche 428 hat, die zur Bildseite B gewandt ist (**Fig. 4B**). Eine detaillierte Vorschrift für die der langsamen Achse zugeordneten Linsen 408 (d.h. die Zylinderlinse 408a und die Zylinderlinse 408b) und die der schnellen Achse zugeordneten Linsen 410 (d.h. die Zylinderlinse 410a und die Zylinderlinse 410b) gemäß einer Ausführungsform der Erfindung wird in der nachstehenden Tabelle 1 bereitgestellt.

Tabelle 1

Oberfläche	Typ	Radius SA (mm)	Radius FA (mm)	Dicke (mm)	Glas	Kommentar
L2 (OBJ-Seite)	RINGFÖRMIG	75,14	unendlich	8	QUARZ	L2 Zylinder langsame Achse (408a)
L2 (BILD-Seite)		unendlich	unendlich	15,514		
L3 (OBJ-Seite)	RINGFÖRMIG	unendlich	-154,87	6,4	QUARZ	L3 Zylinder schnelle Achse (410a)
L3 (BILD-Seite)		unendlich	unendlich	52,518		
L4 (OBJ-Seite)		unendlich	unendlich	6,4	QUARZ	L4 Zylinder schnelle Achse (410b)
L4 (BILD-Seite)	RINGFÖRMIG	unendlich	-182,75	5	5	5
L5 (OBJ-Seite)		unendlich	unendlich	8	QUARZ	L5 Zylinder langsame Achse (408b)
L5 (BILD-Seite)	RINGFÖRMIG	-86,43	unendlich	23	23	23

**[0022]** Das Laserdiodenbarrenarray 202 befindet sich in der vorderen Brennebene des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen 408 mit der Brennweite  $f$ , während sich der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 in der hinteren Brennebene befindet. Im Betrieb erzeugen die der langsamen Achse zugeordneten Linsen 408 den Strahl mit einem konstanten Divergenzwinkel entlang der langsamen Achse. Die Strahlen werden kondensiert und in das Eingangsende des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 konvergiert, d.h. das vorhomogenisierende Linsenarray 502 in der Richtung der optischen Achse Z, wie in **Fig. 4A** gezeigt ist. Die inneren, der schnellen Achse zugeordneten Linsen 410 beseitigen oder senken jegliche Restdivergenz, die von der Zylinderlinse an der Laserdiodenbarrenarray 202 übriggeblieben ist. Die Strahlen werden expandiert und in der Richtung der schnellen Achse in den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 kollimiert, wie in **Fig. 4B** gezeigt ist (der polarisierende Strahlteiler 402, der dichroitische Pyrometerspiegel 404 und die Wellenplatte 406 wurden der Klarheit halber weggelassen). Der Satz der langsamen Achse und schnellen Achse zugeordneter Linsen 408, 410 transformiert den aus dem Laserdiodenbarrenarray 202 ausgegebenen Strahl so, dass die Divergenz in der Richtung der langsamen Achse größer und konstant ist (wie im nächsten Absatz erörtert wird), während der Divergenzwinkel  $\phi$  in der Richtung der schnellen Achse kleiner gemacht wird. Kleinere Konvergenzwinkel, die in der schnellen Achse in den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 führen, bedeuten einen engeren Linienfokus am Wafer 22.



**[0023]** Die Beleuchtungsoptik 400 trägt dazu bei, den Laserstrahl mit der richtigen Divergenz der langsamen Achse zum Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 zu schicken, wo das vorhomogenisierende Linsenarray 502 eine numerische Apertur (NA) von ca. 0,15 hat. Um eine gute Gleichmäßigkeit vom Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 zu erzielen, ist es wichtig, dass die Einfallsdivergenz der langsamen Achse die numerische Apertur (NA) des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 nicht überschreitet. Um die auf den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 einfallende Divergenz der langsamen Achse zu steuern (anzumerken ist, dass die SA-Divergenz aus dem Laserdiodenbarrenarray 202 eine Funktion des elektrischen Stroms/Leistungsoutputs ist), wird die Diodenarrayemissionsebene in Richtung der langsamen Achse durch das Paar Zylinderlinsen 408a, 408b mit der effektiven Brennweite  $f$  von ca. 120 mm optisch Fourier-transformiert. Wegen der Eigenschaften der optischen Fourier-Transformation (wird später noch erörtert), werden Lichtwinkel in der hinteren Brennebene durch die Licht-/Raumpositionen am Laserdiodenbarrenarray 202 bestimmt. Wenn das räumliche Emissionsmuster des Laserdiodenbarrenarrays 202 gleichmäßig und unabhängig von Diodenleistung und geometrisch symmetrisch ist, wird die auf den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 einfallende Divergenz ebenfalls gleichmäßig und unabhängig von Diodenleistung sein. Das räumliche Ausmaß der langsamen Achse von Strahlen am Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 wird andererseits durch die Divergenz der langsamen Achse aus dem Laserdiodenbarrenarray 202 festgelegt und kann je nach dem Prozessschema variieren. Die Beleuchtungsoptik 400 senkt die Divergenz der schnellen Achse um ca. das 1,18-Fache, was in manchen Ausführungsformen notwendig ist, um sicherzustellen, dass die endgültige Linienbreite in der Bildebene des Wafers 22 die  $<80\text{ }\mu\text{m}$ -FWHM-Anforderung mit einer Divergenz der schnellen Achse des Diodenarrays von  $0,135^\circ$  erfüllt. Es ist festzuhalten, dass die der schnellen Achse zugeordneten Linsen 410 entfallen können, wenn die Divergenz der schnellen Achse des Diodenarrays das Ziel von  $<0,12^\circ$  erfüllt.

**[0024]** Fig. 5A stellt eine Ansicht der langsamen Achse des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 500 wie etwa des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 dar, der vorstehend im Hinblick auf Fig. 2 erörtert wurde. Der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 bedient sich im Allgemeinen eines Mikrolinsenarrays wie etwa eines vorhomogenisierenden Linsenarrays 502 (in der Zeichnung als „L8“ ausgewiesen) und eines abschließenden homogenisierenden Linsenarrays 504 (als „L10“ ausgewiesen), das parallel zum vorhomogenisierenden Linsenarray 502 angeordnet und um die Brennweite der Linsen von diesem beabstandet ist, um den Laserstrahl entlang der langsamen Achse zu homogenisieren. In Fällen, in denen es sich bei dem vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und dem abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 um zylindrische Mikrolinsenarrays handelt, können die Achsen der zylindrischen Mikrolinsen des vorhomogenisierenden Linsenarrays 502 und des abschließenden homogenisierenden Linsenarrays 504 entlang einer Achse ausgerichtet sein, die parallel zu einer schnellen Achse des Laserdiodenbarrenarrays 202 ist. Der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 kann

eine numerische Apertur (NA) haben, die speziell gewählt ist, um eine vollkommen sphärische Fourier-Transformationslinse 208 zuzulassen. Obwohl zwei Mikrolinsenarrays (d.h. 502, 504) gezeigt sind, kann der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 mehr Mikrolinsenarrays umfassen, um Sprengel (speckle) im endgültigen Linienbild am Wafer zu reduzieren.

**[0025]** Im Betrieb werden die aus der Lichtquelle, d.h. dem Laserdiodenbarrenarray 202 ausgegebenen Strahlen durch die Zylinderlinsen der Beleuchtungsoptik 204 wie vorstehend erörtert fokussiert und in den Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 mit einem endlichen Konvergenzwinkel entlang der langsamen Achse, aber entlang der schnellen Achse im Wesentlichen kollimiert eingeleitet. Der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 reduziert die Strahlstruktur entlang der langsamen Achse, die durch die mehreren auf der langsamen Achse beabstandeten Laserdioden im Laserbarrenstapel 304 (Fig. 3) eingeführt wird, und gleicht eventuelle Ungleichmäßigkeiten in der Lichtquelle aus. Bei dem vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und dem abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 kann es sich um Zylinderlinsen oder Linsen mit mehreren gekrümmten Oberflächen handeln. In einer in Fig. 5A gezeigten Ausführungsform umfassen das vorhomogenisierende Linsenarray 502 und das abschließende homogenisierende Linsenarray 504 allgemein jeweils ein mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen 503, 505. Fig. 5B zeigt beispielsweise eine Nahansicht der langsamen Achse eines Teils des Mikrolinsenarrays des vorhomogenisierenden Linsenarrays 502. Das Mikrolinsenarray umfasst, so wie es gezeigt ist, zwei benachbarte Zylinderlinsen 503a, 503b mit einem Übergangsbereich 510, der sich zwischen den Zylinderlinsen 503a, 503b befindet. Im Übergangsbereich 510 nähert sich das Oberflächenprofil einer konkaven Zylinderlinse an, die sich nahtlos an die konvexen Zylinderlinsen 503a, 503b anschließt. Die Breite dieses Übergangsbereichs 510 wirkt sich auf die Linienlänge und die Randneigung am Ende des Linienbilds aus. In einem Beispiel ist der Übergangsbereich 510 ca.  $20\text{ }\mu\text{m}$  bis ca.  $60\text{ }\mu\text{m}$ , beispielsweise ca.  $40\text{ }\mu\text{m}$  lang, und jede der Zylinderlinsen 503a, 503b ist ca.  $180\text{ }\mu\text{m}$  bis ca.  $300\text{ }\mu\text{m}$ , beispielsweise ca.  $250\text{ }\mu\text{m}$  lang.

**[0026]** Da eine ausreichende räumliche Kohärenz bei dem auf ein Mikrolinsenarray einfallenden Licht besteht, was zu unerwünschten kohärenten Artefakten beim endgültigen Linienbild führen kann, kann eine zusätzliche Linse, beispielsweise eine schwache Zylinderlinse 506 (in der Zeichnung als „L9“ ausgewiesen) zwischen dem vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und dem abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 eingesetzt werden, um dazu beizutragen, diese Kohärenzungleichmäßigkeiten zu verringern. Die schwache Zylinderlinse 506 kann eine Brennweite von ca. 500 mm haben. Vorstehend wurde gezeigt, dass, um die Bildlinienlängenforderung unter Verwendung einer sphärischen Optik in der anschließenden Fourier-Transformationslinse 208 zu erfüllen, der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 möglicherweise ein Mikrolinsenarray (d.h. Linsenarrays 502, 504) mit einer numerischen Apertur NA von ca. 0,16 in der langsamen Achse benötigt. Die numerische Apertur des Linsenarrays lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$NA = \frac{\text{Teilung} \times \text{Füllfaktor}}{2 \times f} = \frac{\text{Teilung} \times \text{Füllfaktor} \times (n-1)}{2 \times r}$$

worin „Teilung“ der Mikrolinsenarrayabstand (z.B. von der Mitte einer Zylinderlinse 503a zur Mitte einer benachbarten Zylinderlinse 503b), „Füllfaktor“ das Verhältnis der Mikrolinsenbreite zur Teilung, „f“ die Brennweite einer Mikrolinse, „r“ der Krümmungsradius der Vorder- und Rückseite der Mikrolinse und „n“ der Brechungsindex des Arraymaterials bei der Sollwellenlänge ist. In Fällen, in denen das Mikrolinsenarray Quarzglas verwendet, beträgt der Brechungsindex n ca. 1,453 bei  $\lambda$  von ca. 808 nm. Der Füllfaktor des Mikrolinsenarrays wird in erster Linie durch das Herstellungsverfahren bestimmt. In einer Ausführungsform handelt es sich bei dem Mikrolinsenarray, das im vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 verwendet wird, um LI-MO-Linsenarrays (erhältlich von LIMO GmbH, Dortmund, Deutschland), der Füllfaktor wurde messtechnisch als >90% liegend ermittelt. Nachstehende Tabelle 2 stellt eine optische Vorschrift für das vorhomogenisierende Linsenarray 502 und das abschließende homogenisierende Linsenarray 504 bereit, die im Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 gemäß einer Ausführungsform der Erfindung verwendet wird. Das Mikrolinsenarray Nr. 1 stellt das vorhomogenisierende Linsenarray 502 dar, das dazu dient, Kohärenzungleichmäßigkeit in der Bildlinie zu verringern. Das vorhomogenisierende Linsenarray 502 hat eine Teilung von ca. 275  $\mu\text{m}$  und eine NA von ca. 0,155, was etwas weniger ist als beim Mikrolinsenarray Nr. 2, welches das abschließende homogenisierende Linsenarray 504 darstellt, das dieselbe optische Vorschrift hat wie Array Nr. 1, mit Ausnahme einer größeren Teilung von ca. 290  $\mu\text{m}$ , die in einer größeren NA von ca. 0,164 resultiert. Experimentell wurde beobachtet, dass der Mikrolinsenarray-Homogenisierer 500 am besten funktioniert, wenn er durch einfallendes Licht mit einer NA der langsamen Achse beleuchtet wird, die nahe an der Mikrolinsenarray-NA des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 liegt, diese aber nicht überschreitet. Insbesondere werden Interferenzeffekte, die sich aus der räumlichen Kohärenz des Laserdiodenbarrenarrays 202 ergeben, dadurch verringert, dass die Einfallslicht-NA nahe an der Mikrolinsenarray-NA liegt. Deshalb kann eine Teilungsdifferenz zwischen dem vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und dem abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 vorteilhaft sein, um eine Frequenzinterferenz zwischen zwei Linsenarrays 502, 504 zu reduzieren, die auftreten würde, wenn sie identische Teilungen hätten.

**[0027]** Die optischen Parameter wurden zum Bereitstellen einer Teilung gewählt, die klein genug ist, dass eine ausreichende Anzahl von Mikrolinsen, d.h. ein mikrooptisches Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen 503, 505, durch das Laserdiodenbarrenarray 202 und die Beleuchtungsoptik 204 beleuchtet wird. In einem Beispiel kann es ungefähr 50 Zylinderlinsen 503, 505 jeweils im vorhomogenisierenden Linsenarray 502 und abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 geben, die eine Strahlbreite von ca. 15 mm im Mikrolinsenarray-Homogenisierer 206 abdecken.

Tabelle 2

Technische Beschreibung	Array Nr. 1	Array Nr. 2
Material	Quarzglas	Quarzglas
Breite (entlang FA)	30,0 +/- 0,05 mm	30,0 +/- 0,05 mm
Höhe (entlang SA)	30,0 +/- 0,05 mm	30,0 +/- 0,05 mm
Dicke	1,207 +/- 0,05 mm	1,207 +/- 0,05 mm
freie Öffnung	28 × 28 mm <sup>2</sup>	28 × 28 mm <sup>2</sup>
Teilung	0,275 +/- 0,001 mm	0,290 +/- 0,001 mm
Radius	0,3764 +/- 0,0075 mm	0,3764 +/- 0,0075 mm

Technische Beschreibung	Array Nr. 1	Array Nr. 2
Füllfaktor	>90 %	>90 %
numerische Apertur (NA)	-0,155	-0,164
Oberflächengüte	<50 nm p-v-Abweichung von einem Zyl	<50 nm p-v-Abweichung von einem Zyl
Durchlässigkeit	>99 % für 808 und 1020 nm, 0 - 30 Grad	>99 % für 808 und 1020 nm, 0 - 30 Grad
Substratrandausrichtung*	0,2 mR	0,2 mR

\* max. Winkel zwischen mechanischer Substratkante und Linsenarrayachse

**[0028] Fig. 6A** stellt eine Ansicht der langsamen Achse von Laserstrahlen dar, die sich durch einen beispielhaften Kondensorlinsensatz 600 wie etwa die Fourier-Transformationslinse 208 ausbreiten, die vorstehend im Hinblick auf **Fig. 2** erörtert wurde. Bei dem Kondensorlinsensatz 600 kann es sich um eine beliebige geeignete Fourier-Transformationslinse oder den Kondensorlinsensatz 600 mit einer speziellen Linsenanordnung handeln, wie nachstehend im Hinblick auf **Fig. 6A** beschrieben wird. Die Fourier-Transformationslinse ist dazu konzipiert, ein Linienbild auf den Wafer 22 zu fokussieren, und verfügt über eine spezifische optische Verzerrung, die an die Strahlungsstärkenverteilung angepasst ist, die durch das abschließende Mikrolinsenarray erzeugt wird. Zweckmäßigerweise ist die Linsengestaltung astigmatisch, was eine einfachere Gestaltung mit weniger einzelnen Linsenelementen ermöglicht, aber immer noch eine Qualitätsabbildung eines Linienbilds zulässt, ohne sich negativ auf die Liniengleichmäßigkeit auszuwirken. In einer Ausführungsform umfasst der Kondensorlinsensatz 600 allgemein ein Linsenarray, das, in der Reihenfolge von einer Objektseite A zu einer Bildseite B, fünf einzelne Linsen umfasst, z.B. eine erste Linse 602, eine zweite Linse 604, eine dritte Linse 606, eine vierte Linse 608 und eine fünfte Linse 610 (in der Zeichnung als „L11“, „L12“, „L13“, „L14“ bzw. „L15“ ausgewiesen), die entlang der optischen Achse Z angeordnet sind und alle sphärische Oberflächen haben. Der Kondensorlinsensatz 600 mit allen sphärischen Linsen ermöglicht im Vergleich zu einer anamorphen Auslegung, die sich sowohl einer zylindrischen als auch sphärischen Oberflächenoptik bedient, eine wirtschaftlichere Herstellung und einfachere Ausrichtung. Eine detaillierte Vorschrift für jede Einzellinse 602, 604, 606, 608 und 610 gemäß einer Ausführungsform der Erfindung wird in der nachstehenden Tabelle 3 bereitgestellt.

Tabelle 3

Oberfl. Art	Radius [mm]	Dicke [mm]	Material	Durchmesser [mm]	Kantendicke (X-Kante/Y-Kante) [mm]
Objekt	unendlich	unendlich		0	
Aperturblende	unendlich	6,880859		8,248815	2,739422/2,739422
L1 (OBJ-Seite)	-25,73401	4	QUARZ	28	9,320045/9,320045
L1 (BILD-Seite)	109,192	10,87737		32	8,249291/8,249291
L2 (OBJ-Seite)	-131,8937	11,5001	QUARZ	39	4,117087/4,117087
L2 (BILD-Seite)	-39,79702	7,80948		50	17,799024/17,799024
L3 (OBJ-Seite)	315,5999	12,99995	QUARZ	54	5,968442/5,968442
L3 (BILD-Seite)	-64,98561	0,5000262		54	10,493407/10,493407
L4 (OBJ-Seite)	90,55326	10,52833	QUARZ	54	4,774647/4,774647
L4 (BILD-Seite)	-223,7871	0,4999986		54	10,532183/10,532183
L5 (OBJ-Seite)	47,60484	10,00019	QUARZ	54	3,615662/3,615662
L5 (BILD-Seite)	156,2545	15,6		50	13,587088/13,587088
W1 (OBJ-Seite)	unendlich	3	QUARZ	37,16273	3,000000/3,000000
W1 (BILD-Seite)	unendlich	8		35,74045	8,000000/8,000000
W2 (OBJ-Seite)	unendlich	6	QUARZ	30,04821	6,000000/6,000000

Oberfl. Art	Radius [mm]	Dicke [mm]	Material	Durchmesser [mm]	Kantendicke (X-Kante/Y-Kante) [mm]
W2/BILD-Seite)	unendlich	20,5		27,20364	20,500000/20,500000
BILD	unendlich			12,61728	0,000000/0,000000

**[0029]** Fig. 6A kann auch ein ersetzbares Ausgabefenster 612 (in der Zeichnung als W1 ausgewiesen) und ein Kammerfenster 614 (in der Zeichnung als W2 ausgewiesen) beinhalten. Das ersetzbare Ausgabefenster 612 schützt das Innere des optischen Systems 200. Ein kollimierter Laserstrahl kann durch das Kammerfenster 614 in die Kammer eintreten. Bei den Wärmebearbeitungsanwendungen kann das Kammerfenster 614 größer sein als der Wafer 22, der bearbeitet wird. Und zwar, weil ein leichter Zugang zu allen Teilen des Wafers als Teil der Bearbeitung benötigt werden kann. Es ist anzumerken, dass die Erfindung nicht auf diese spezielle Anzahl von Linsen beschränkt ist und alternative Ausführungsformen eine andere Anzahl von Linsen umfassen können. Die spezifischen optischen Eigenschaften jeder der Linsen und die Weise, auf die sie kombiniert werden, können die Form der überlagerten Bilder definieren, die auf der Oberfläche des Wafers 22 bereitgestellt werden.

**[0030]** Der Kondensorlinsensatz 600 wie etwa die Fourier-Transformationslinse 208, bildet das endgültige Linienbild am Wafer 22 (Fig. 2). Sie wird als Fourier-Transformationslinse bezeichnet, weil das Bild in ihrer hinteren Brennebene gebildet wird. Als solche wirkt die Linse im unendlich Konjugierten, wodurch Eingangsstrahlen mit einem bestimmten Einfallswinkel in einer Position in der Bildebene des Wafers 22 abgebildet werden. Die verallgemeinerte Verzerrungsfunktion der Linse  $g(\theta)$  bestimmt die Abbildung eines Eingangswinkels  $\theta$  in der Bildposition  $y$ , wie durch  $y = f g(\theta)$  definiert ist. Die normalisierte Strahlungsintensität  $I(\theta)$ , die unmittelbar nach dem abschließenden homogenisierenden Linsenarray 504 erzeugt wird, ist ein Maß der optischen Energie pro Bogenmaß, das heißt,  $I(\theta)d\theta$  ist die Energie, die zwischen den Strahlwinkeln  $\theta$  und  $\theta + d\theta$  enthalten ist (man gehe der Einfachheit halber von  $I(0) = 1$  aus). Aufgrund der Aberrationen, die dem Mikrolinsenarray mit moderat hoher NA eigen sind, ist die Funktion  $I(\theta)$  kein Top-Hat-Profil (siehe (a) von Fig. 6B), sondern wird vielmehr durch eine quadratische Gleichung gut dargestellt (siehe (b) von Fig. 6B),  $I(\theta) = 1 + c_2 \theta^2$ . Die normalisierte Bestrahlungsstärkenfunktion  $H(y)$  in der Bildebene des Wafers 22 wird so definiert, dass  $H(y)dy$  die Energie innerhalb des Bereichs  $y$  bis  $y + dy$  ist. Für eine hochgleichmäßige Bestrahlungsstärke ist  $H(y)$  konstant, was der Einfachheit halber als Einheit hergenommen wird, und die Verzerrungsabbildung  $y = g(\theta)$  ist die Abbildung, die  $H(y) = 1$  ergibt. Durch die Energieerhaltung lässt sich das Folgende unter der Abbildung  $g(\theta)$  erhalten, die den Winkel  $\theta$  in eine Position  $y$  umsetzt:  $I(\theta)d\theta = H(y)dy$  oder

$$g'(\theta) = \frac{dy}{d\theta} = \frac{I(\theta)}{H(y)} = I(\theta), \text{ da für eine gleichmäßige Top-Hat-Bestrahlungsstärke } H(y) = 1 \text{ ist.}$$

**[0031]** Weil die normalisierte Strahlungsintensität, die durch das abschließende homogenisierende Linsenarray 504 erzeugt wird, durch die quadratische Gleichung  $I(\theta) = 1 + c_2 \theta^2$  dargestellt werden kann, wird eine Gleichung  $\frac{dy}{d\theta} = 1 + c_2 \theta^2$  erhalten. Von hier aus lässt sich mühelos das Endergebnis für die gewünschte verallgemeinerte Verzerrungsabbildung  $y = g(\theta) = \theta + \frac{c_2 \theta^3}{3}$  erhalten. Dies ist die verallgemeinerte Verzerrungsabbildung, die zu einer Bestrahlungsstärke  $H(y)$  mit Flat Top in der Bildebene des Wafers 22 führen wird. Der einzige Parameter ist der quadratische Strahlungsstärkenkoeffizient  $c_2$ . Verzerrung in einem optischen Aufbau wird von der Konvention her in Bezug auf  $\tan(\theta)$  spezifiziert, weil  $\tan(\theta)$  die Abbildung ist, die eine x-y-Objektebene in eine x'-y'-Bildebene des Wafers 22 ohne Verzerrung bei endlichen Objekt-/Bildabständen abbildet. Da  $\tan(\theta)$  ca.  $\theta + \theta^3/3 + \dots$  ist, kann durch diese Konvention  $c_2 = 1$  für eine Linse mit „null“ Verzerrung angenommen werden. Im Spezielleren kann durch die Definition, die in der allgemeinen optischen Auslegungssoftware verwendet wird, die durch die vorstehend definierte verallgemeinerte Abbildung  $g(\theta)$  gekennzeichnete Verzerrung einer Linse als

$$\text{Auslegung\_Verzerrung} = \frac{g(\theta) - \tan(\theta)}{\tan(\theta)} = \frac{\theta + 1/3 c_2 \theta^3 - \tan(\theta)}{\tan(\theta)} \text{ definiert werden. Deshalb kann, sobald } c_2$$

bekannt ist, die Verzerrung spezifiziert werden, die in jeder einzelnen Linse des Kondensorlinsensatzes 600 benötigt wird. In einem Beispiel, in dem der Kondensorlinsensatz 600 eine Fourier-Transformationslinse ist und die quadratische Kurve, die zur Strahlungsstärke passt,  $c_2 = -1,35$  ergibt, ist die gewünschte Fourier-Transformationslinsenverzerrung (ausgehend von einer  $\tan(\theta)$ -Verzerrung) -2,14 % bei einem Feldwinkel von 1,66 Bogenmaß oder 9,5°. Die zur Auslegung der Fourier-Transformationslinse verwendete Gütefunktion ist so definiert, dass die Bildpunktgröße in Richtung der schnellen Achse minimiert wird. In verschiedenen

Ausführungsformen ist der Kondensorlinsensatz 600 dazu gestaltet, Folgendes bereitzustellen: (1) eine effektive Brennweite von ca. 38 mm, die durch eine Divergenz der schnellen Achse so festgelegt ist, dass wie vorstehend erörtert eine Linienbreite von 80 mm FWHM erfüllt wird; (2) Eingangsfeldwinkel (langsame Achse) von  $\pm 9,5^\circ$ , was durch die NA (ca. 0,164) des Mikrolinsenarray-Homogenisierers 206 festgelegt wird; (3) eine hintere Brennweite (d.h. das Kammerfenster 614 zum Abbilden am Wafer 22) von ca. 20,5 mm; und (4) eine Verzerrung (in Bezug auf  $\tan(\theta)$ ) von ca. -2,14 % bei einem maximalen Feldwinkel von  $9,5^\circ$ . Eine weitere Vorschrift für den Kondensorlinsensatz 600 gemäß der vorliegenden Erfindung lässt sich in der vorstehenden Tabelle 3 und der nachstehenden Tabelle 4 finden.

Tabelle 4

Systemapertur	Eintrittspupillendurchmesser = 22,63 mm
Temperatur	2,00000E + 001
Druck (°C)	1,01325 bar (1,00000E + 000 ATM)
Effektive Brennweite (mm)	38,00002 (in Luft bei Systemtemperatur/-druck)
Effektive Brennweite (mm)	38,00002 (im Bildraum)
Hintere Brennweite (mm)	20,55506
Gesamtbahn (mm)	128,6963
Bildraum F/#	1,679188
Paraxialer Funktionsablauf F/#	1,679188
Funktionsablauf F/#	1,679959
Bildraum NA	0,2853803
Objektraum NA	1,1315e-009
Anschlag Radius (mm)	11,315
Paraxiale Bildhöhe (mm)	6,359023
Paraxiale Vergrößerung	0
Eintrittspupillendurchmesser (mm)	22,63
Eintrittspupillenstellung	0
Austrittspupillendurchmesser (mm)	132,5966
Austrittspupillenstellung	222,7096
Feldart	Winkel in Graden
Maximales Radialfeld	9,5
Primäre Wellenlänge	0,808 $\mu\text{m}$
Linseneinheiten	Millimeter
Winkelvergrößerung	-0,1706681

**[0032]** Obwohl der Kondensorlinsensatz 600 so aufgebaut werden kann, dass die Bildpunktgröße in Richtung der schnellen Achse minimiert wird, kann es die Verwendung aller sphärischen Linsen zulassen, dass die Linse einen Astigmatismus aufweist. Ein Bildpunktwachstum in Richtung der langsamen Achse bewirkt eine insignifikante Linienerläuterung und Erweichung an den Linienenden. Es wurde jedoch gezeigt, dass eine solche Linsenkonstruktion kein Nachteil für eine Linienbreite in Richtung der schnellen Achse ist, sondern vielmehr eine einfachere Auslegung mit weniger einzelnen Linsenelementen mit Qualitätsabbildung eines Linienbilds zulässt, ohne sich negativ auf die Liniengleichmäßigkeit auszuwirken. Es ist vorgesehen, dass die Anzahl von im Kondensorlinsensatz 600 verwendeten Linsen nicht wie erörtert auf fünf sphärische Elemente beschränkt ist. Ein Fachmann kann anhand der vorstehenden Gleichung die Linse wie nötig ergänzen oder entfernen, um die Verzerrung zu optimieren, die in jeder einzelnen Linse des Kondensorlinsensatzes 600 benötigt wird.

**[0033] Fig. 7** stellt eine Ansicht der langsamen Achse einer Linseanordnung eines optischen Systems 700 dar, das ein Laserdiodenbarrenarray 202, eine Beleuchtungsoptik (402, 408a - 408b, 410a - 410b, 404 und 406), einen Mikrolinsenarray-Homogenisierer (502, 504 und 506), und einen Kondensorlinsensatz (602, 604, 606, 608, 610, 612 und 614) wie vorstehend erörtert und eine Pyrometersammeloptik (702, 704, 706 und 708) nach einer Ausführungsform der Erfindung umfasst. In **Fig. 7** ist die optische Achse von einer oder mehreren elektromagnetischen Quelle/n (d.h. dem Laserdiodenbarrenarray 202) zu einer Oberfläche des Wafers 22 als Z-Achse bezeichnet. Die langsame Achse („SA“) des optischen Systems 700 ist in dieser Zeichnung ausgewiesen, wobei die schnelle Achse („FA“), wie gezeigt, orthogonal zur Papierseite ist. Wie vorstehend im Hinblick auf **Fig. 4A** kurz erörtert wurde, wird, um die Wafertemperatur zu regeln oder zu steuern, die Temperatur des beleuchteten Abschnitts des Wafers 22 durch die Pyrometersammeloptik konstant überwacht. Dieselbe Optik, die zum Kollimieren und Fokussieren des Laserquellenstrahls auf den Wafer 22 verwendet wird, wird eingesetzt, um vom erwärmten Wafer 22 abgegebene Wärmestrahlung in die umgekehrte Richtung zu einem Pyrometer 702 zu leiten. Die Wärmestrahlung kann durch den Kondensorlinsensatz (602, 604, 606, 608, 610, 612 und 614), den Mikrolinsenarray-Homogenisierer (502, 504 und 506) und den dichroitischen Pyrometerspiegel 404 mit einer Beschichtung (z.B.  $\text{SiO}_2$  und/oder  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) zurück ausgebreitet werden, die gleichzeitig über ein hohes Reflexionsvermögen bei den Pyrometriewellenlängen (z.B. 940 nm und 1550 nm) und einen hohen Durchlass bei der primären Laserwellenlänge 808 nm verfügt. Bei ihren zweiten Zusammentreffen mit dem dichroitischen Pyrometerspiegel 404 wird die Wärmestrahlung, die vom erwärmten Wafer 22 mit einer Wellenlänge von  $940 \pm 5$  nm oder  $1550 \pm 5$  nm abgegeben wird, durch den dichroitischen Pyrometerspiegel 404 zu einem optischen Filter 704 umgelenkt, das die Wellenlänge, z.B. 808 nm, der Laserstrahlung blockiert. Die Laserstrahlung mit den Pyrometriewellenlängen wird durch ein optionales Prisma 706 zu einer Linse 708 reflektiert, welche die Laserstrahlung auf eine Fläche des Pyrometers 702 fokussiert. Der Ausgang des Pyrometers wird an ein (nicht gezeigtes) Steuergerät geliefert, das den erfassten Fotostrom in eine Wafertemperatur umsetzt und diese mit einer Solltemperatur vergleicht und dabei die dem Laserdiodenbarrenarray 202 zugeführte Energie einstellt.

### Patentansprüche

1. Wärmebearbeitungsvorrichtung (2) zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats (22), Folgendes umfassend:  
eine Substrathalterung;  
eine Laserstrahlungsquelle (202) zum Emittieren von Laserstrahlung entlang eines optischen Pfads (200);  
eine entlang des optischen Pfads (200) angeordnete Beleuchtungsoptik (204), die aufweist:  
einen Satz einer langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (408a) und einer zweiten Zylinderlinse (408b), die voneinander beabstandet sind; und  
einen Satz einer schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (410a) und einer zweiten Zylinderlinse (410b), die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) zwischen der ersten Zylinderlinse (408a) und der zweiten Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) angeordnet ist; und  
einen Homogenisierer (206), der zwischen der Beleuchtungsoptik (204) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet ist, wobei der Homogenisierer (206) umfasst:  
ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray (502); und  
ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray (504), wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray (504) eine relativ größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502), und Mikrolinsenachsen des ersten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (502) und Mikrolinsenachsen des zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (504) entlang einer Achse ausgerichtet sind, die parallel zu einer schnellen Achse der Laserstrahlungsquelle ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, darüber hinaus umfassend:  
mehrere Kondensorlinsen (600), die zwischen dem Homogenisierer (206) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet sind, wobei die mehreren Kondensorlinsen (600) über mindestens fünf Linsen (602, 604, 606, 608, 610) mit sphärischen Oberflächen verfügen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502) und das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray (504) jeweils über mehrere gekrümmte Flächen verfügen.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei es sich bei dem ersten mikrooptischen Mikrolinsenarray (502) und dem zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarray (504) um Zylinderlinsen handelt.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Laserstrahlungsquelle (202) 27 Laserdiodenbarren (302) umfasst, die in einem 3x9 Array angeordnet sind.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die erste Zylinderlinse (408a) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (420) hat, die der Laserstrahlungsquelle (202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (422) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, wobei die erste Zylinderlinse (410a) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konkave Linsenoberfläche (426) hat, die der Laserstrahlungsquelle (202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (410b) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konvexe Linsenoberfläche (428) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502) aus Zylinderlinsen eine numerische Apertur NA von im Wesentlichen 0,15 hat.
9. Wärmebearbeitungsvorrichtung (2) zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats (22), Folgendes umfassend:  
 eine Substrathalterung;  
 ein Array (202) aus Laserdiodenbarren (302), die Laserstrahlung mit einer ersten Wellenlänge emittieren, wobei das Array (202) aus Laserdiodenbarren (302) in mehreren parallelen Reihen angeordnet ist, die sich entlang einer langsamen Achse erstrecken, wobei die Reihen von Laserdiodenbarren (302) in einem Stapel (304) entlang einer schnellen Achse angeordnet sind, wobei die langsame Achse und die schnelle Achse orthogonal zu einem optischen Pfad (200) zwischen dem Laserdiodenbarrenarray (202) und der Substrathalterung sind,  
 eine Beleuchtungsoptik (204), die zwischen dem Laserdiodenbarrenarray (202) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads angeordnet ist, wobei die Beleuchtungsoptik (204) umfasst:  
 einen polarisierenden Strahlteiler (402);  
 einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (408a) und einer zweiten Zylinderlinse (408b), die voneinander beabstandet sind;  
 einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (410a) und einer zweiten Zylinderlinse (410b), die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) zwischen der ersten Zylinderlinse (408a) und der zweiten Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) angeordnet ist;  
 einen dichroitischen Spiegel (404), der dem Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) nachgeordnet vorgesehen und dazu ausgelegt ist, vom erwärmten Substrat (22) reflektierte Laserstrahlung mit einer zweiten und einer dritten Wellenlänge zu einem Pyrometer (702) umzuleiten; und  
 eine Wellenplatte (406), die dem dichroitischen Spiegel (404) nachgeordnet vorgesehen ist, um die lineare Polarisierung von Laserstrahlung in eine zirkuläre Polarisierung zu transformieren;  
 einen Homogenisierer (206), der zwischen der Beleuchtungsoptik (204) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet ist, um Laserstrahlung entlang der langsamen Achse zu homogenisieren, wobei der Homogenisierer (206) umfasst:  
 ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray (502); und  
 ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray (504) mit einer relativ größeren Mikrolinsenteilung als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502); und  
 einen Kondensorlinsensatz (600), der zwischen dem Homogenisierer (206) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet ist, um ein Linienbild auf eine Oberfläche des Substrats (22) zu fokussieren, wobei der Kondensorlinsensatz (600) über mindestens fünf Linsen (602, 604, 606, 608, 610) mit sphärischen Oberflächen verfügt.
10. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei die Laserstrahlungsquelle (202) 27 Laserdiodenbarren (302) umfasst, die in einem 3x9 Array angeordnet sind.
11. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei die erste Zylinderlinse (408a) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (420) hat, die dem Laserdiodenbarrenarray (202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (422) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.
12. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei die erste Zylinderlinse (410a) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konkave Linsenoberfläche (426) hat, die dem Laserdiodenbarrenarray

(202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (410b) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konvexe Linsenoberfläche (428) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei die Mikrolinsenachsen des ersten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (502) und die Mikrolinsenachsen des zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (504) entlang einer Achse ausgerichtet sind, die parallel zu einer schnellen Achse der Laserstrahlungsquelle (202) ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei die erste Wellenlänge ungefähr 808 nm beträgt, die zweite Wellenlänge ungefähr 940 nm beträgt und die dritte Wellenlänge ungefähr 1550 nm beträgt.

15. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei der Homogenisierer (206) darüber hinaus umfasst: eine schwache Zylinderlinse (506), die zwischen dem ersten mikrooptischen Mikrolinsenarray (502) aus Zylinderlinsen und dem zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarray (504) aus Zylinderlinsen eingesetzt ist.

16. Wärmebearbeitungsvorrichtung (2) zum Bearbeiten eines Halbleitersubstrats (22), Folgendes umfassend:

eine Substrathalterung;

ein Array (202) aus Laserdiodenbarren (302), die in mehreren parallelen Reihen angeordnet sind, die sich entlang einer langsamen Achse erstrecken, wobei die Reihen von Laserdiodenbarren (302) in einem Stapel entlang einer schnellen Achse angeordnet sind, wobei die langsame Achse allgemein senkrecht zur schnellen Achse ist;

eine Beleuchtungsoptik (204), die zwischen dem Laserdiodenbarrenarray (202) und der Substrathalterung angeordnet ist, wobei die Beleuchtungsoptik (204) umfasst:

einen Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (408a) und einer zweiten Zylinderlinse (408b), die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen Laserstrahlstrahlung in der langsamen Achse kollimiert; und

einen Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) mit mindestens einer ersten Zylinderlinse (410a) und einer zweiten Zylinderlinse (410b), die voneinander beabstandet sind, wobei der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) zwischen der ersten und zweiten Zylinderlinse (408a, 408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) angeordnet ist, um Laserstrahlstrahlung in der schnellen Achse zu kollimieren; und

einen Homogenisierer (206), der zwischen der Beleuchtungsoptik (204) und der Substrathalterung angeordnet ist, um von der Beleuchtungsoptik (204) kollimierte Laserstrahlstrahlung entlang der langsamen Achse zu homogenisieren, wobei der Homogenisierer (206) umfasst:

ein erstes mikrooptisches Mikrolinsenarray (502) aus Zylinderlinsen; und

ein zweites mikrooptisches Mikrolinsenarray (504) aus Zylinderlinsen, die parallel zum und beabstandet vom ersten mikrooptischen Mikrolinsenarray (502) aus Zylinderlinsen angeordnet sind, wobei das zweite mikrooptische Mikrolinsenarray (504) aus Zylinderlinsen eine relativ größere Mikrolinsenteilung hat als das erste mikrooptische Mikrolinsenarray (502) aus Zylinderlinsen, und Mikrolinsenachsen des ersten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (502) und Mikrolinsenachsen des zweiten mikrooptischen Mikrolinsenarrays (504) entlang einer Achse ausgerichtet sind, die parallel zu einer schnellen Achse der Laserstrahlungsquelle ist; und

einen Kondensorlinsensatz (600), der zwischen dem Homogenisierer (206) und der Substrathalterung entlang des optischen Pfads (200) angeordnet ist, um ein Linienbild auf eine Oberfläche des Substrats (22) zu fokussieren, wobei der Kondensorlinsensatz (600) über mindestens fünf Linsen (602, 604, 606, 608, 610) mit sphärischen Oberflächen verfügt.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei die erste Zylinderlinse (408a) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (420) hat, die dem Laserdiodenbarrenarray (202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (408b) des Satzes der langsamen Achse zugeordneter Linsen (408) eine konvexe Linsenoberfläche (422) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei die erste Zylinderlinse (410a) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konkave Linsenoberfläche (426) hat, die dem Laserdiodenbarrenarray (202) zugewandt ist, und die zweite Zylinderlinse (410b) des Satzes der schnellen Achse zugeordneter Linsen (410) eine konvexe Linsenoberfläche (428) hat, die der Oberfläche des Substrats (22) zugewandt ist.



19. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei der Satz der langsamen Achse zugeordneter Linsen und der Satz der schnellen Achse zugeordneter Linsen eine optische Vorschrift haben, die in der folgenden Tabelle (L2-L5) gezeigt ist:

Oberfläche	Typ	Radius SA (mm)	Radius FA (mm)	Dicke (mm)	Glas	Kommentar
L2 (OBJ-Seite)	RINGFÖRMIG	75,14	unendlich	8	QUARZ	L2 Zylinder langsame Achse (408a)
L2 (BILD-Seite)		unendlich	unendlich	15,514		
L3 (OBJ-Seite)	RINGFÖRMIG	unendlich	-154,87	6,4	QUARZ	L3 Zylinder schnelle Achse (410a)
L3 (BILD-Seite)		unendlich	unendlich	52,518		
L4 (OBJ-Seite)		unendlich	unendlich	6,4	QUARZ	L4 Zylinder schnelle Achse (410b)
L4 (BILD-Seite)	RINGFÖRMIG	unendlich	-182,75	5		
L5 (OBJ-Seite)		unendlich	unendlich	8	QUARZ	L5 Zylinder langsame Achse (408b)
L5 (BILD-Seite)	RINGFÖRMIG	-86,43	unendlich	23		

20. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei das erste und zweite mikrooptische Mikrolinsenarray aus Zylinderlinsen eine optische Vorschrift haben, die in der folgenden Tabelle gezeigt ist:

Technische Beschreibung	Array Nr. 1	Array Nr. 2
Material	Quarzglas	Quarzglas
Breite (entlang FA)	30,0 +/- 0,05 mm	30,0 +/- 0,05 mm
Höhe (entlang SA)	30,0 +/- 0,05 mm	30,0 +/- 0,05 mm
Dicke	1,207 +/- 0,05 mm	1,207 +/- 0,05 mm
freie Öffnung	28 × 28 mm <sup>2</sup>	28 × 28 mm <sup>2</sup>
Teilung	0,275 +/- 0,001 mm	0,290 +/- 0,001 mm
Radius	0,3764 +/- 0,0075 mm	0,3764 +/- 0,0075 mm
Füllfaktor	>90 %	>90 %
numerische Apertur (NA)	~0,155	~0,164
Oberflächengüte	<50 nm p-v-Abweichung von einem Zvl	<50 nm p-v-Abweichung von einem Zvl
Durchlässigkeit	>99% für 808 und 1020 nm, 0 - 30 Grad	>99% für 808 und 1020 nm, 0 - 30 Grad
Substratrandausrichtung*	02 mR	02 mR

\* max. Winkel zwischen mechanischer Substratkante und Linsenarrayachse

21. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei der Kondensorlinsensatz eine optische Vorschrift hat, die in der folgenden Tabelle (L1-L5):

Oberfl. Art	Radius (mm)	Dicke (mm)	Material	Durchmesser (mm)	Kantendicke (X-Kante/Y-Kante) (mm)
Objekt	unendlich	unendlich		0	
Aperturblende	unendlich	6,880859		8,248815	2,739422/2,739422

Oberfl. Art	Radius (mm)	Dicke (mm)	Material	Durchmesser (mm)	Kantendicke (X-Kante/Y-Kante) (mm)
L1 (OBJ-Seite)	-25,73401	4	QUARZ	28	9,320045/9,320045
L1 (BILD-Seite)	109,192	10,87737		32	8,249291/ 8,249291
L2 (OBJ-Seite)	-131,8937	11,5001	QUARZ	39	4,117087/4,117087
L2 (BILD-Seite)	-39,79702	7,80948		50	17,799024/17,799024
L3 (OBJ-Seite)	315,5999	12,99995	QUARZ	54	5,968442/5,968442
L3 (BILD-Seite)	-64,98561	0,5000262		54	10,493407/10,493407
L4 (OBJ-Seite)	90,55326	10,52833	QUARZ	54	4,774647/4,774647
L4 (BILD-Seite)	-223,7871	0,4999986		54	10,532183/10,532183
L5 (OBJ-Seite)	47,60484	10,00019	QUARZ	54	3,615662/3,615662
L5 (BILD-Seite)	156,2545	15,6		50	13,587088/13,587088
W1 (OBJ-Seite)	unendlich	3	QUARZ	37,16273	3,000000/3,000000
W1 (BILD-Seite)	unendlich	8		35,74045	8,000000/8,000000
W2 (OBJ-Seite)	unendlich	6	QUARZ	30,04821	6,000000/6,000000
W2/BILD-Seite)	unendlich	20,5		27,20364	20,500000/20,500000
BILD	unendlich			12,61728	0,000000/0,000000

und der folgenden Tabelle gezeigt ist:

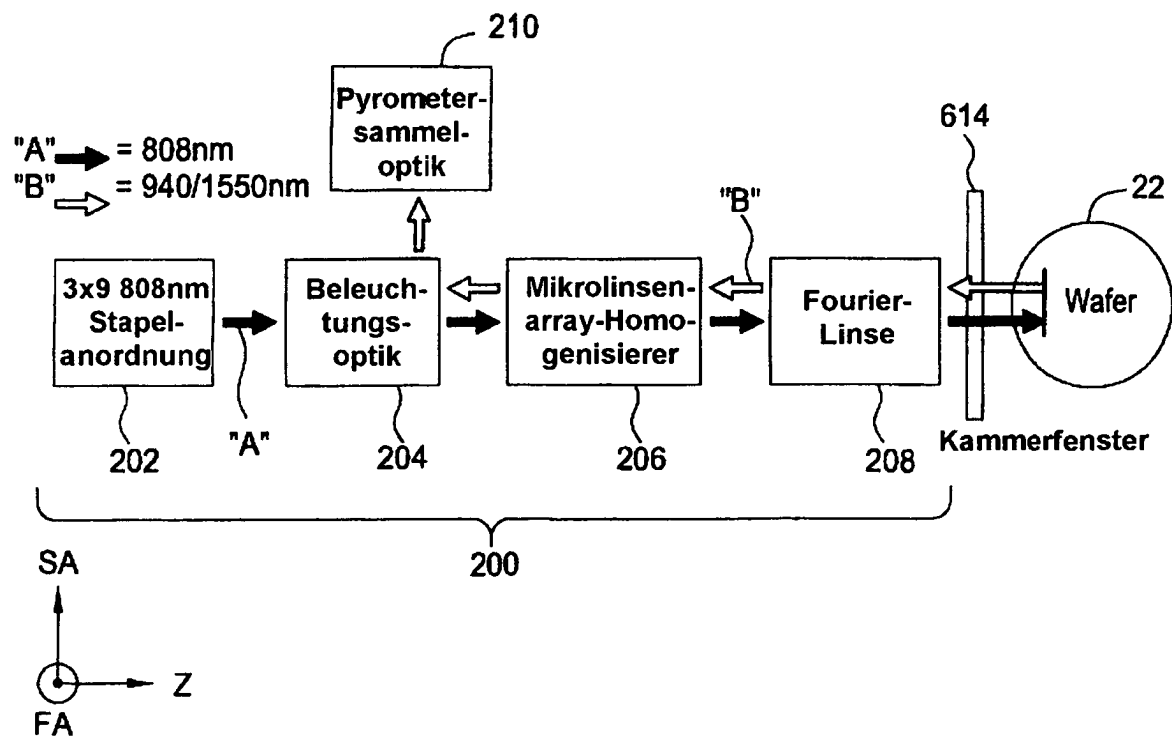
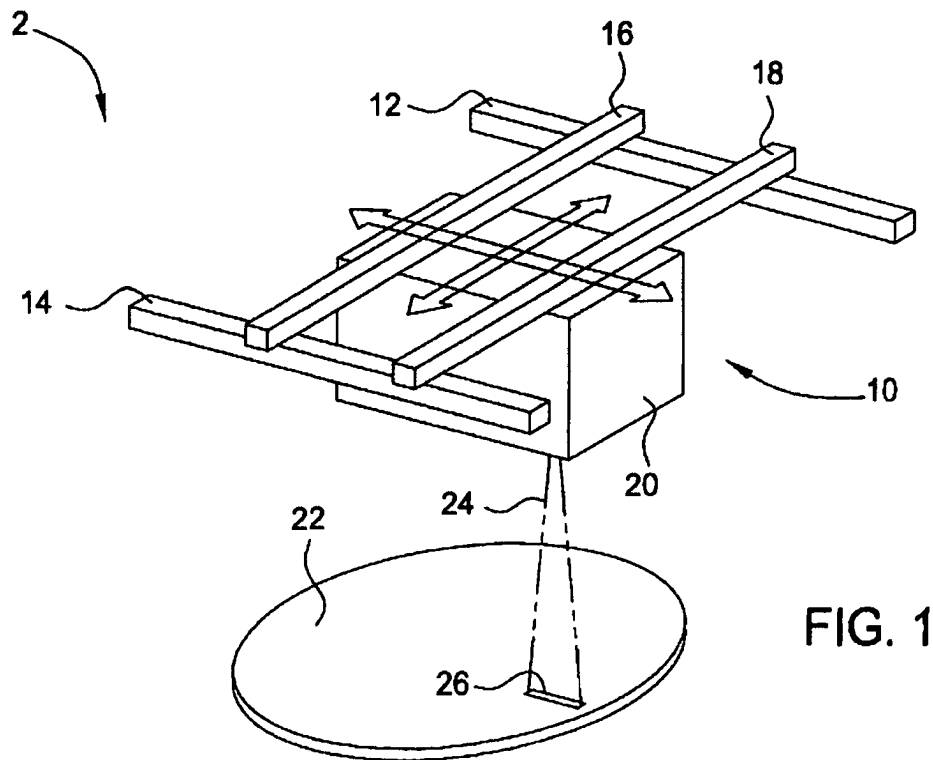
Systemapertur	Eintrittspupillendurchmesser = 22,63 mm
Temperatur (°C)	2,00000E + 001
Druck	1,01325 bar (1,00000E + 000 ATM)
Effektive Brennweite (mm)	38,00002 (in Luft bei SystemtemperaturAdruck)
Effektive Brennweite (mm)	38,00002 (im Bildraum)
Hintere Brennweite (mm)	20,55506
Gesamtbahn (mm)	128,6963

Bildraum F/#	1,679188
Paraxialer Funktionsablauf F/#	1,679188
Funktionsablauf F/#	1,679959
Bildraum NA	0,2853803
Objektraum NA	1,1315e-009
Anschlag Radius (mm)	11,315
Paraxiale Bildhöhe (mm)	6,359023
Paraxiale Vergrößerung	0
Eintrittspupillendurchmesser (mm)	22,63
Eintrittspupillenstellung	0
Austrittspupillendurchmesser (mm)	132,5966
Austrittspupillenstellung	222,7096
Feldart	Winkel in Graden
Maximales Radialfeld	9,5

Primäre Wellenlänge	0,808 $\mu\text{m}$
Linseneinheiten	Millimeter
Winkelvergrößerung	-0,1706681

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



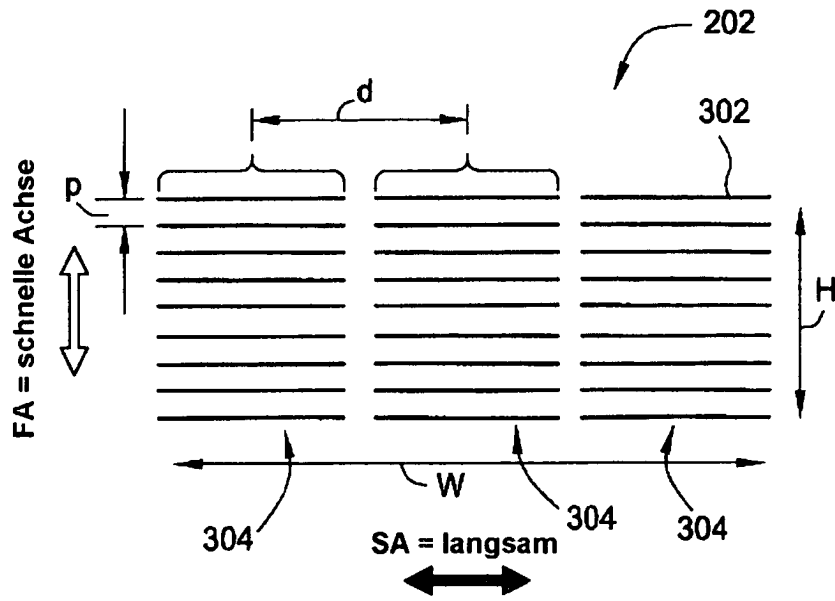


FIG. 3

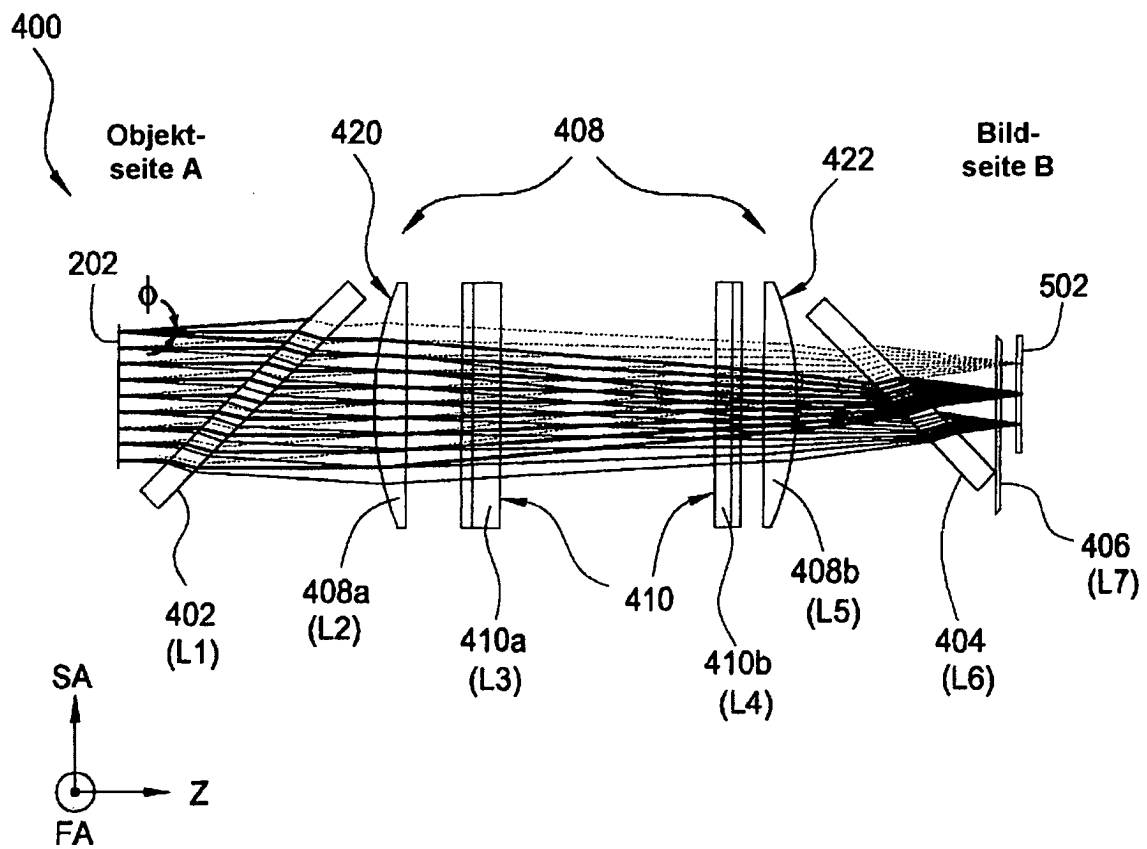
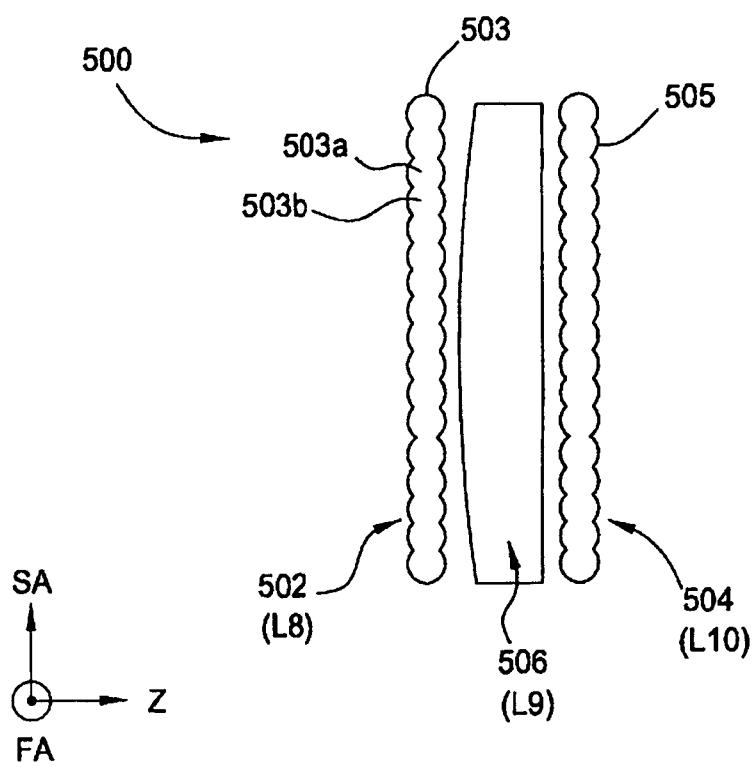
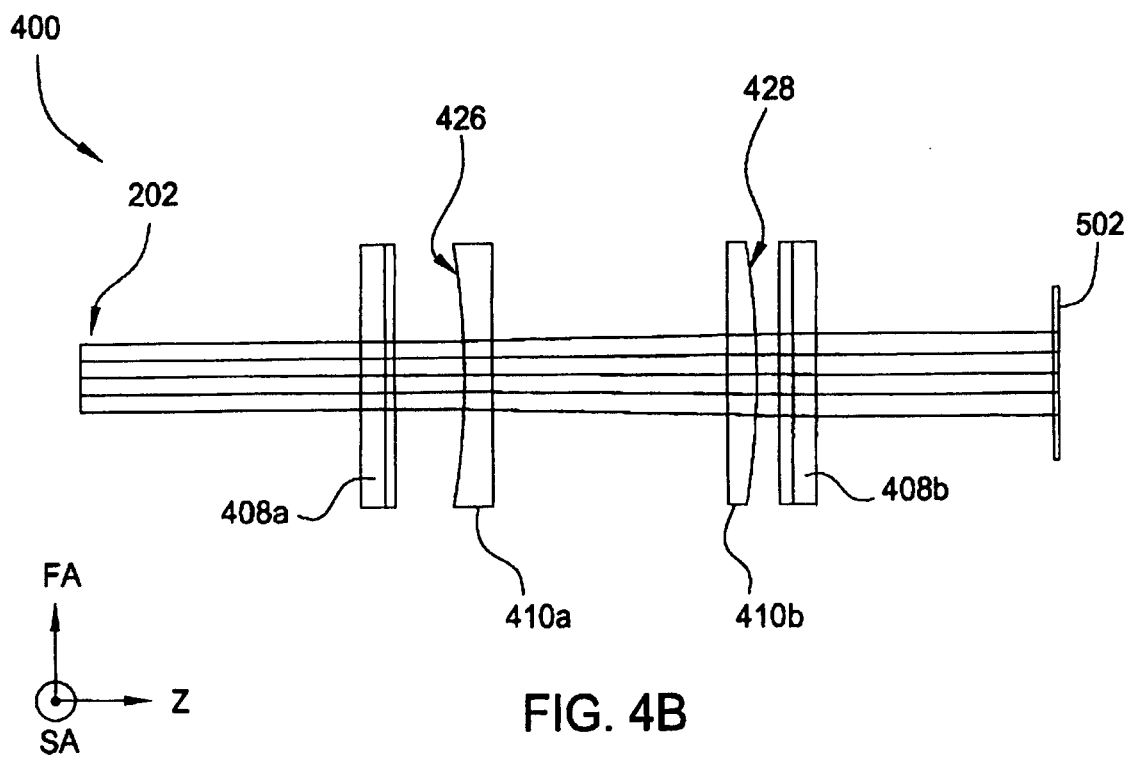


FIG. 4A



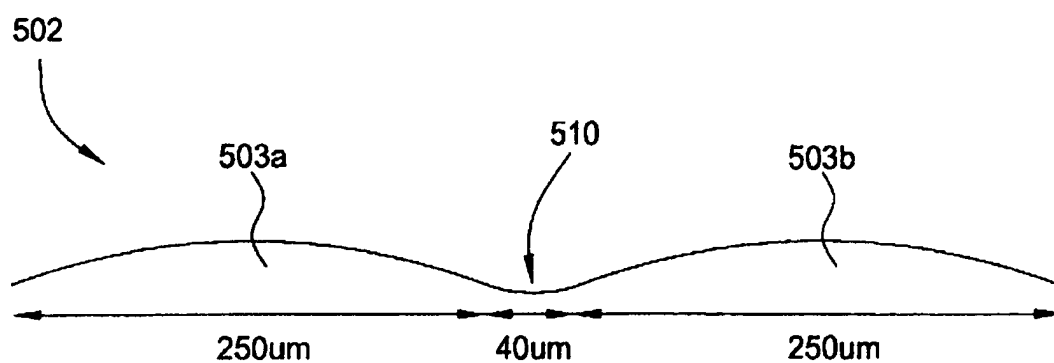


FIG. 5B

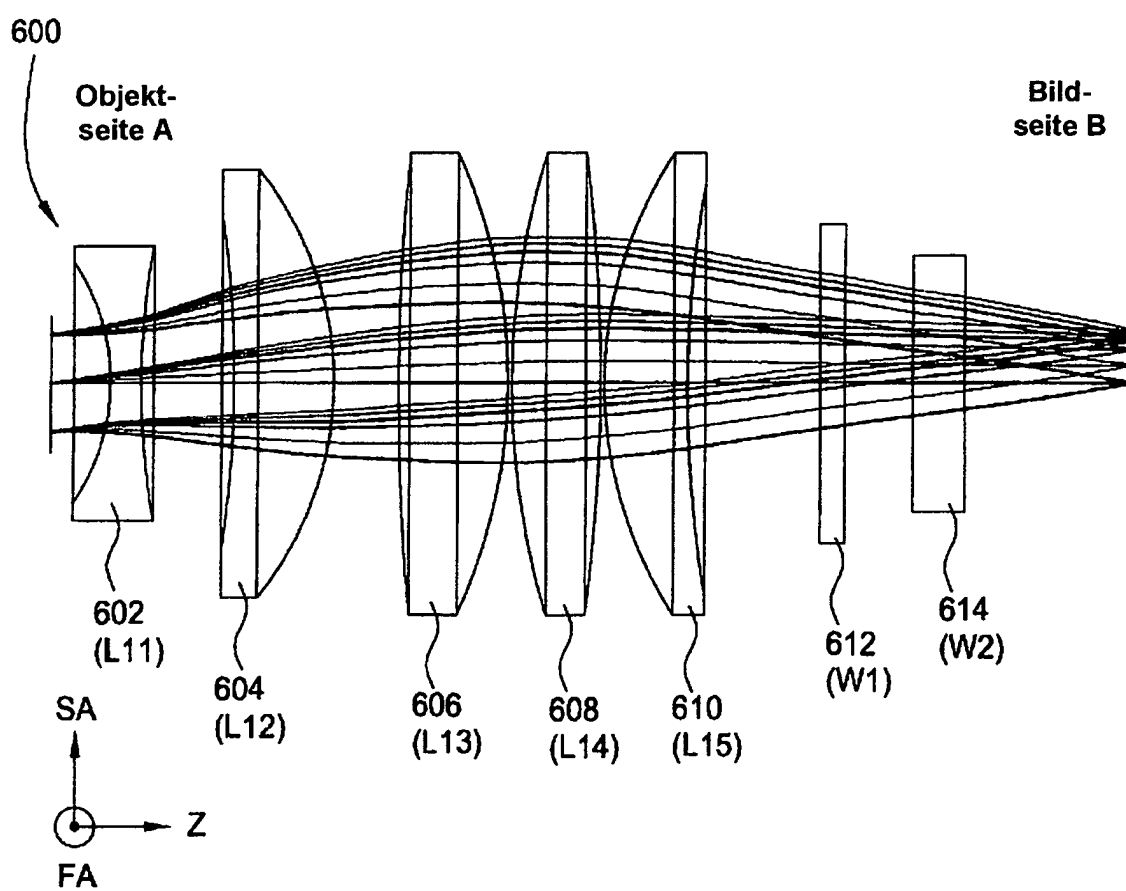


FIG. 6A

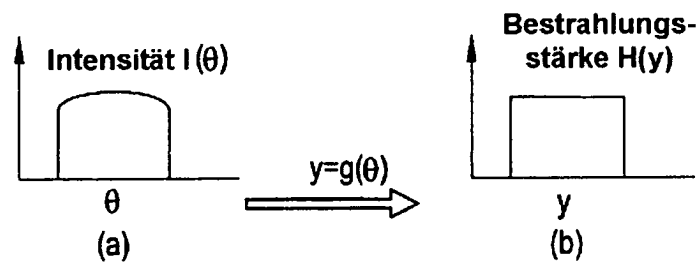


FIG. 6B

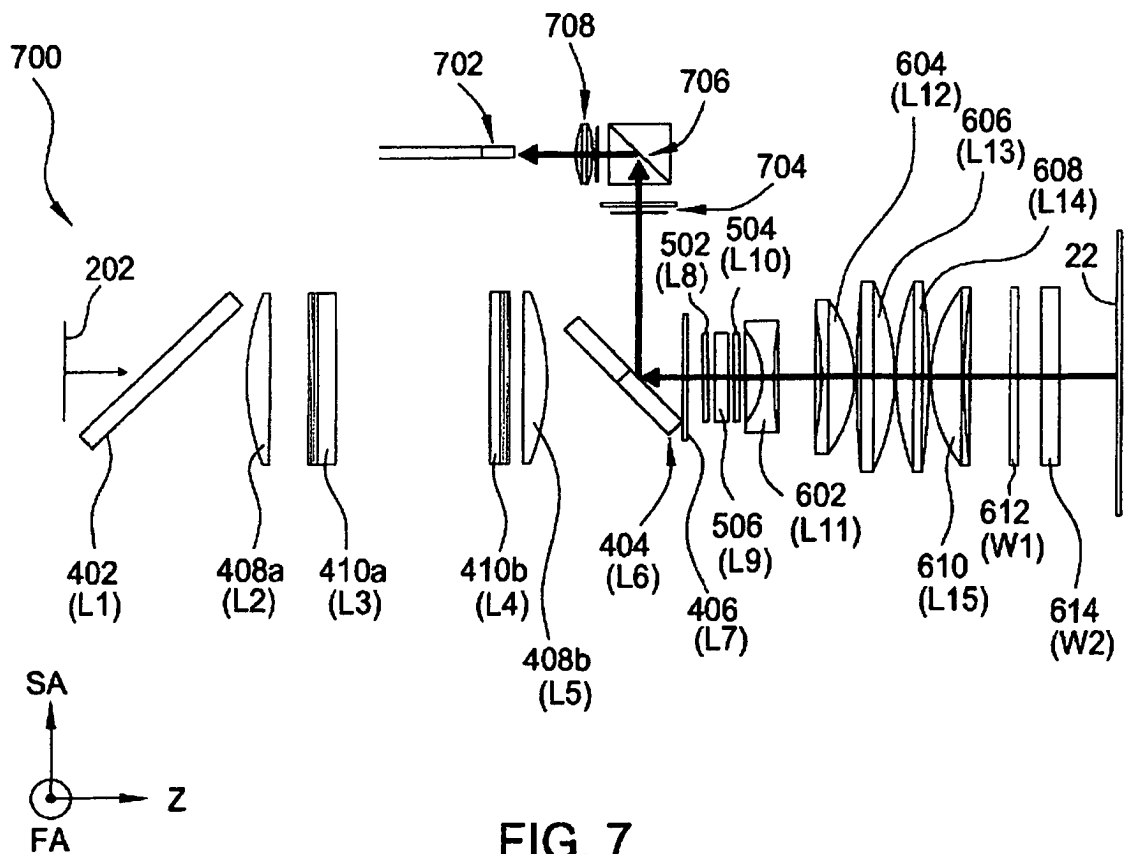


FIG. 7