

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges  
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales  
Veröffentlichungsdatum  
21. Januar 2016 (21.01.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2016/008768 A1**

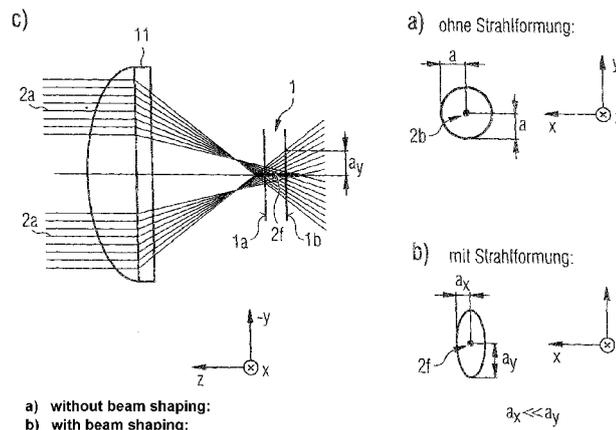
- (51) Internationale Patentklassifikation:  
*B23K 26/00* (2014.01) *B23K 26/0622* (2014.01)  
*B23K 26/06* (2014.01) *B23K 101/40* (2006.01)  
*B23K 26/073* (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/065476
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
7. Juli 2015 (07.07.2015)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2014 213 775.6 15. Juli 2014 (15.07.2014) DE
- (71) Anmelder: INNOLAS SOLUTIONS GMBH [DE/DE];  
Pionierstraße 6, 82152 Krailling (DE).
- (72) Erfinder: BÖHME, Rico; Schillingstraße 1 a, 09306  
Rochlitz (DE). WEBER, Daniel; Landsberger Straße 482,  
81241 München (DE).
- (74) Anwalt: PFENNING, MEINIG & PARTNER GBR;  
Theresienhöhe 11a, 80339 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,  
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,  
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,  
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,  
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,  
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,  
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,  
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,  
ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,  
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,  
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,  
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,  
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR THE LASER-BASED WORKING OF TWO-DIMENSIONAL, CRYSTALLINE SUBSTRATES, IN PARTICULAR SEMICONDUCTOR SUBSTRATES

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM LASERBASIERTEM BEARBEITEN VON FLÄCHIGEN, KRISTALLINEN SUBSTRATEN, INSBESONDERE VON HALBLEITERSUBSTRATEN

FIG 1



(57) Abstract: The present invention relates to a method for the laser-based working of a two-dimensional, crystalline substrate in order to separate the substrate into a number of parts, in which the laser beam (2a, 2f) of a laser (3) for working the substrate (1) is directed onto the latter, in which an optical arrangement (6) positioned in the path of rays of the laser (3) is used to form from the laser beam (2a) radiated onto the optical arrangement (6), on the side on which the beam emerges from it, a laser beam focal area (2f) with an extent both along the direction of the beam (z) and in just one first direction (y) transverse to the direction of the beam (z) but not with an extent in a second direction (x) that is perpendicular both to the first direction (y) and to the direction of the beam (z), wherein the substrate (1) is positioned in relation to the laser beam focal area (2f) in such a way that the laser beam focal area (2f) produces an induced absorption inside the substrate (1) along an extended portion of the area (2c) of the substrate material, as a result of which induced cracks are formed in the substrate material along this extended portion of the area (2c).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2016/008768 A1



---

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG). — **Veröffentlicht:** mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

---

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum laserbasierten Bearbeiten eines flächigen, kristallinen Substrats, um das Substrat in mehrere Teile zu trennen, bei dem der Laserstrahl (2a, 2f) eines Lasers (3) zum Bearbeiten des Substrats (1) auf letzteres gerichtet wird, bei dem mit einer im Strahlengang des Lasers (3) positionierten optischen Anordnung (6) aus dem auf letztere eingestrahlten Laserstrahl (2a) strahlausgangseitig der optischen Anordnung (6) eine sowohl längs der Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau eine erste Richtung (y) senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnte, jedoch nicht in eine zweite Richtung (x), die sowohl senkrecht zur ersten Richtung (y) als auch zur Strahlrichtung (z) ist, ausgedehnte Laserstrahlbrennfläche (2f) geformt wird, wobei das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche (2f) so positioniert wird, dass die Laserstrahlbrennfläche (2f) im Inneren des Substrats (1) entlang eines ausgedehnten Flächenabschnitts (2c) des Substratmaterials eine induzierte Absorption erzeugt, durch die entlang dieses ausgedehnten Flächenabschnitts (2c) induzierte Rissbildungen im Substratmaterial erfolgen.

Verfahren und Vorrichtung zum laserbasierten Bearbeiten von flächigen,  
kristallinen Substraten, insbesondere von Halbleitersubstraten

5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum laserbasierten  
Bearbeiten eines flächigen, kristallinen Substrats, um das Substrat in mehrere  
Teile zu trennen, und auf eine entsprechende Vorrichtung sowie auf die  
Verwendung eines solchen Verfahrens oder einer solchen Vorrichtung. Ziel ist  
dabei insbesondere, flächige Substrate in Form von Halbleiterwafern in  
mehrere Teile zu trennen (Auseinzeln der Wafer). Dabei wird mit in der Regel  
10 gepulsten Lasern mit einer Wellenlänge gearbeitet, für die die Materialien des  
Substrats im Wesentlichen transparent sind.

Aus dem Stand der Technik sind bereits Vorrichtungen und Verfahren zum  
Durchtrennen solcher Materialien mittels Laser bekannt.

15

Gemäß DE 10 2011 000 768 A1 kann man Laser verwenden, die vermöge ihrer

Wellenlänge oder ihrer Leistung vom Material stark absorbiert werden, oder nach erster Wechselwirkung das Material stark absorbierend machen (Erwärmung mit z.B. Erzeugung von Ladungsträgern; induzierte Absorption), und dann das Material ablatieren können. Diese Methode hat bei vielen Materialien Nachteile: z.B. Verunreinigungen durch Partikelbildung bei der Ablation; Schnittkanten können Mikrorisse aufweisen aufgrund des thermischen Eintrags; Schnittkanten können Schmelzränder aufweisen; der Schnittspalt ist über die Dicke des Materials nicht gleichförmig (hat unterschiedliche Breite in unterschiedlicher Tiefe; z.B. keilförmige Schnittkerbe). Da Material verdampft oder verflüssigt werden muss, muss eine hohe mittlere Laserleistung bereitgestellt werden.

Weiterhin gibt es Verfahren, bei denen ein Laser verwendet wird, bei dessen Wellenlänge das Material weitgehend transparent ist, sodass ein Brennpunkt im Inneren des Materials erzeugt werden kann. Die Intensität des Lasers muss so hoch sein, dass an diesem inneren Brennpunkt im Material des bestrahlten Substrats eine innere Schädigung stattfindet.

Letztgenannte Verfahren haben den Nachteil, dass die induzierte Rissbildung punktförmig in einer bestimmten Tiefe, bzw. an der Oberfläche, stattfindet, somit die volle Dicke des Materials erst über eine zusätzliche, mechanisch und/oder thermisch induzierte Risspropagation durchtrennt wird. Da Risse sich tendenziell ungleichförmig ausbreiten, ist die Trennfläche meist von hoher Rauheit und muss oft nachbearbeitet werden. Zudem muss derselbe Prozess mehrfach in verschiedenen Tiefen angewandt werden. Das wiederum verlängert die Prozessgeschwindigkeit um das entsprechend Vielfache.

Ausgehend vom Stand der Technik ist es daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren (sowie eine entsprechende Vorrichtung) zur Verfügung zu stellen, mit dem flächige, kristalline Substrate insbesondere aus Halbleitermaterialien ohne Partikelbildung, ohne Schmelzränder, mit minimaler Rissbildung am Rand, ohne merkliche Schnittspalte (also Materialverluste) mit möglichst geraden Schnittkanten und mit hoher Prozessgeschwindigkeit bearbeitet, insbesondere vollständig durchtrennt werden können.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie durch eine

Vorrichtung gemäß Anspruch 12 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsvarianten und/oder Weiterbildungen des Verfahrens bzw. der Vorrichtung lassen sich jeweils den abhängigen Ansprüchen entnehmen. Wesentliche erfindungsgemäße Verwendungen sind im Anspruch 18 beschrieben.

5

Nachfolgend wird die vorliegenden Erfindung zunächst allgemein, dann anhand mehrerer Ausführungsbeispiele im Detail beschrieben. Die in den einzelnen Ausführungsbeispielen in Kombination miteinander gezeigten Merkmale müssen dabei im Rahmen der Erfindung nicht alle verwirklicht sein. Insbesondere können einzelne Merkmale auch weggelassen werden oder auf andersartige Art und Weise mit anderen gezeigten Merkmalen desselben Ausführungsbeispiels oder auch anderer Ausführungsbeispiele kombiniert werden. Auch können bereits einzelne Merkmale eines Ausführungsbeispiels für sich vorteilhafte Weiterbildungen des Standes der Technik aufzeigen.

10

15

Nachfolgend wird zunächst die Grundlage der vorliegenden Erfindung (Mechanismus des Trennens des Substrats in einzelne Teile gemäß der Erfindung) beschrieben.

20

Das Verfahren zum Trennen gemäß der Erfindung erzeugt pro Laserpuls eine Laserstrahlbrennfläche (im Unterschied zu einem Brennpunkt) mittels einer dazu geeigneten Laseroptik (nachfolgend auch als optische Anordnung bezeichnet). Die Brennfläche bestimmt die Zone der Wechselwirkung zwischen Laser und Material des Substrats. Fällt die Brennfläche in das zu trennende Material, so können die Laserparameter so gewählt werden, dass eine Wechselwirkung mit dem Material stattfindet, die gemäß der Erfindung Risszonen entlang der Brennfläche (also verteilt über diese Fläche) erzeugt. Wichtige Laserparameter sind hier die Wellenlänge des Lasers und die Impulsdauer des Lasers.

25

30

Für die Wechselwirkung des Laserlichts mit dem Material gemäß der Erfindung sollte bevorzugt folgendes gegeben sein:

35

1) Die Wellenlänge des Lasers ist bevorzugt so gewählt, dass das Material im wesentlichen transparent bei dieser Wellenlänge ist (konkret z.B.: Absorption  $\ll 10\%$  pro mm Materialtiefe  $\Rightarrow \gamma \ll 1/\text{cm}$ ;  $\gamma$ : Lambert-Beer'scher Absorptions-

koeffizient).

2) Die Impulsdauer des Lasers ist bevorzugt so gewählt, dass innerhalb der Wechselwirkungszeit kein wesentlicher Wärmetransport (Wärmediffusion) aus der Wechselwirkungszone heraus stattfinden kann (konkret z.B.:  $\tau \ll F/\alpha$ , F: Größe der Laserstrahlbrennfläche,  $\tau$  Laserimpulsdauer,  $\alpha$ : Wärmediffusionskonstante des Materials).

3) Die Pulsenergie des Lasers ist bevorzugt so gewählt, dass die Intensität in der Wechselwirkungszone, also in der Brennfläche eine induzierte Absorption erzeugt, welche zu einer lokalen Erwärmung des Materials über die Brennfläche führt, welche wiederum zu Rissbildungen über die Brennfläche infolge des in das Material eingebrachten thermischen Stresses führt.

4) Weiterhin sollte die Intensität über die Impulsdauer, die Pulsenergie und die Ausdehnung bzw. Größe der Laserstrahlbrennfläche so gewählt sein, dass keine Ablation oder Aufschmelzung, sondern nur Rissbildungen im Gefüge des Festkörpers erfolgen. Diese Anforderung ist für typische Materialien wie Halbleiter oder transparenten Kristallen am leichtesten zu erfüllen mit gepulsten Lasern im Sub-Nanosekunden-Bereich, insbesondere also mit Pulsdauern von z.B. zwischen 10 und 100 ps.

Nachfolgend wird die Erzeugung der Geometrie einer gewünschten Trennfläche (Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Substrat entlang einer Linie auf der Substratoberfläche) beschrieben.

Die erfindungsgemäße Wechselwirkung mit dem Material erzeugt pro Laserpuls einen einzelnen (in Richtung senkrecht zur Substratoberfläche und in Vorschubrichtung des Laserstrahls gesehen) Risszonenbereich im Material über eine Brennfläche. Für das vollständige Durchtrennen des Materials wird eine Abfolge solcher Risszonenbereiche pro Laserpuls so eng aneinander entlang der gewünschten Trennlinie gesetzt, dass sich eine laterale Verbindung der Risszonenbereiche zu einer gewünschten Rissfläche/Kontur im Material ergibt. Dafür wird der Laser mit einer bestimmten Folgefrequenz gepulst.

Zur Erzeugung der gewünschten Trennfläche im Material kann entweder das gepulste Laserlicht mit einer parallel zur Substratebene (und ggf. auch senkrecht dazu) beweglichen optischen Anordnung über das stationäre Material bewegt werden, oder das Material selbst wird mit einer beweglichen Aufnahme an der stationären optischen Anordnung so vorbei bewegt, dass die gewünschte Trennlinie ausgeformt wird.

5

Schließlich erfolgt noch der letzte Schritt des Auftrennens des Substrats in die mehreren Teile (Separation bzw. Auseinander im engeren Sinn).

10

Die Separation des Materials entlang der erzeugten Rissfläche/kontur erfolgt dabei entweder durch Eigenspannung des Materials, oder durch eingebrachte Kräfte, z.B. mechanisch (Zug) oder thermisch (ungleichförmige Erwärmung/Abkühlung). Da erfindungsgemäß kein Material ablatiert wird, gibt es in der Regel zunächst keinen durchgehenden Spalt im Material, sondern nur eine hoch gestörte Bruchfläche (Mikrorisse), die in sich verzahnt und u.U. noch durch Brücken verbunden ist. Durch die nachfolgend eingebrachten Kräfte werden über laterales (parallel zur Substratebene erfolgendes) Risswachstum die verbliebenen Brücken getrennt und die Verzahnung überwunden, sodass sich das Material entlang der Trennfläche separieren lässt.

15

20

Nachfolgend werden die wesentlichen Merkmale eines erfindungsgemäßen Verfahrens sowie einer erfindungsgemäßen Vorrichtung anhand der Patentansprüche beschrieben.

25

Anspruch 1 beschreibt die wesentlichen Merkmale eines erfindungsgemäßen Verfahrens, Anspruch 12 beschreibt die wesentlichen Bauelemente einer zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildeten Vorrichtung.

30

Die in den Ansprüchen 1 und 12 beschriebene, mittels der optischen Anordnung erzeugte Laserstrahlbrennfläche wird vorangehend und nachfolgend alternativ vereinfacht auch als Brennfläche des Laserstrahls bezeichnet. Erfindungsgemäß wird das Substrat durch die erfindungsgemäße Rissbildung (induzierte Absorption über die sich senkrecht zur Substratebene in das Substrat erstreckende, ausgedehnte Brennfläche) in der Substratebene gesehen in die mehreren Teil aufgetrennt bzw. ausgeeinzelt. Die erfindungs-

35

gemäßige Rissbildung erfolgt somit senkrecht zur Substratebene in das Substrat bzw. in das Innere des Substrats hinein. Wie bereits beschrieben, müssen in der Regel eine Vielzahl einzelner Laserstrahlbrennflächenabschnitte entlang einer Linie auf der Substratoberfläche in das Substrat eingebracht werden, damit die einzelnen Teile des Substrats voneinander separiert werden können. Hierzu kann entweder das Substrat parallel zur Substratebene relativ zum Laserstrahl bzw. zur optischen Anordnung verfahren werden oder umgekehrt die optische Anordnung parallel zur Substratebene relativ zum ortsfest angeordneten Substrat bewegt werden.

Vorteilhafterweise werden erfindungsgemäß zusätzlich die Merkmale mindestens eines der abhängigen Verfahrens- oder Vorrichtungsansprüche realisiert. Dabei können auch die Merkmale mehrere abhängiger Ansprüche in beliebiger Kombination realisiert werden.

Unter dem Begriff der Fläche (also Laserstrahlbrennfläche) wird im mathematischen Sinn ein in zwei Dimensionen endlich ausgedehntes Gebilde verstanden. Dabei kann die Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche in den beiden besagten Dimensionen (näherungsweise) durch die volle Breite bei halbem Maximalwert (englisch: "full width at half maximum") definiert werden. Erfindungsgemäß ist die Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche in Richtung senkrecht zu besagten beiden Dimensionen sehr viel geringer als in die besagten beiden Dimensionen, vorzugsweise um mindestens das 10-fache, das 50-fache, das 100-fache oder sogar das 500-fache geringer. Der Begriff "entlang des Flächenabschnitts" meint dabei dasselbe wie "über die gesamte Fläche dieses Abschnitts gesehen". Unter der induzierten Absorption wird ein Prozess verstanden, der zum Ausbilden von Mikrostrukturstörungen im Kristallgefüge des Substrats führt. Die Mikrostrukturstörungen definieren dann Teile einer Sollbruchfläche, entlang derer bzw. über die das Auftrennen des Substrats in die mehreren Teile erfolgt. Dabei wird (ohne Beschränkung der Allgemeinheit) angenommen, dass durch die lokale Absorption von Energie im Laserstrahlbrennflächenbereich eine Amorphisierung eintritt, durch die sich das Substratmaterial ausdehnt. Die Ausdehnungen führen zu Druckspannungen, wodurch lokal Risse im bzw. über den ausgedehnten Flächenabschnitt induzierter Absorption auftreten.

Vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich dem abhängigen Anspruch 2 entnehmen.

5 Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale sind im Anspruch 3 beschrieben. Dabei kann die Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche in die jeweilige Raumrichtung durch diejenige Strecke, über die die Intensität im Laserstrahl mindestens halb so groß ist wie die maximal im Laserstrahl erreichte Intensität, definiert werden.

10 Wird ein Verfahren gemäß Anspruch 4 realisiert, so erstreckt sich der ausgedehnte Flächenabschnitt der induzierten Absorption im Inneren des Substrats von einer Oberfläche des Substrats bis in eine definierte Tiefe des Substrats (oder auch darüber hinaus). Der ausgedehnte Abschnitt der induzierten  
15 Absorption kann dabei die gesamte Substrattiefe von einer zur anderen Oberfläche umfassen. Auch ist es möglich, lediglich im Inneren des Substrats (ohne dass auch die Oberflächen des Substrats umfasst sind) länglich ausgedehnte Abschnitte der induzierten Absorption zu erzeugen.

20 Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 5 entnehmen (siehe auch nachfolgend noch beschriebene Figur 3). Der ausgedehnte Flächenabschnitt der induzierten Absorption (also z.B. senkrecht zur Substratebene eingebrachte Risslängen) kann sich somit sowohl von einer bestimmten Tiefe im Inneren des Substrats bis hin zur rückseitigen Oberfläche des Substrats erstrecken oder auch z.B. von der vorderseitigen Oberfläche des  
25 Substrats bis in eine bestimmte Tiefe im Inneren des Substrats. Die Schichtdicke  $d$  wird dabei jeweils senkrecht zu den beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen des flächigen Substrats gemessen.

30 Beim Anspruch 5 sowie bei sämtlichen anderen Ansprüchen inkludieren die genannten Bereichsgrenzen jeweils den angegebenen oberen und unteren Grenzwert.

35 Erfindungsgemäß wird die induzierte Absorption vorteilhafterweise gemäß Anspruch 6 erzeugt. Dies geschieht mittels der Einstellung der bereits beschriebenen, nachfolgend noch im Rahmen von Beispielen erläuterten und auch in den abhängigen Ansprüchen 7 bis 9 erwähnten Laserparameter, der

Parameter der optischen Anordnung sowie der geometrischen Parameter der Anordnung der einzelnen Elemente der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

Grundsätzlich ist dabei jede beliebige Merkmalskombination von Parametern, wie sie in den Ansprüchen 7 bis 9 genannt sind, möglich. Im Anspruch 8

5 bedeutet dabei  $\tau \ll F/\alpha$ , dass  $\tau$  weniger als 1 %, bevorzugt weniger als 1 ‰ von  $F/\alpha$  beträgt (dabei ist  $F$  die Flächenausdehnung der Laserstrahlbrennfläche). Beispielsweise kann die Impulsdauer  $\tau$  bei 10 ps (oder auch darunter), zwischen 10 und 100 ps oder auch über 100 ps betragen. Für das Trennen von Si-Substraten wird bevorzugt ein Er:YAG Laser mit einer Wellenlänge zwischen  
10 1.5 und 1.8  $\mu\text{m}$  eingesetzt. Generell wird für Halbleitersubstrate bevorzugt ein Laser mit einer Wellenlänge eingesetzt, die so gewählt ist, dass die Photonenenergie kleiner ist als die Bandlücke des Halbleiters.

Die zur endgültigen Separation bzw. zum Auseinanderlösen des Substrats in seine  
15 mehreren Teile ggf. noch notwendigen zusätzlichen Verfahrensschritte sind in den abhängigen Ansprüchen 10 und 11 beschrieben. Wie bereits erwähnt wird entweder das Substrat relativ zur optischen Anordnung (samt Laser) oder die optische Anordnung (samt Laser) relativ zum Substrat bewegt. Unter dem Abstand  $A$  wird dabei nicht der Abstand zwischen den beiden sich unmittelbar gegenüberliegenden (in Strahlrichtung  $z$ , also ins Substrat hinein gesehen)  
20 Begrenzungen zweier unmittelbar benachbarter (also durch zeitlich aufeinanderfolgende Laserpulse erzeugter) Flächenabschnitte induzierter Absorption verstanden, sondern der Abstand zwischen ein und derselben Begrenzung (beispielsweise der in Bewegungsrichtung des Lasers entlang der gewünschten Trennlinie gesehen vorne liegenden Begrenzung) zweier unmittelbar  
25 benachbarter Flächenabschnitte induzierter Absorption. Ziel ist also, möglichst ohne Überlappung der einzelnen im Innern des Substrats erzeugten induzierten Absorptionen (ansonsten ergäben sich aufgrund näherungsweise doppelter absorbierten Intensitäten im Überlappbereich zu große Unterschiede in den Mikrostrukturstörungen im Kristallgefüge entlang der gewünschten Trennlinie) und mit möglichst geringen Lücken dazwischen benachbarte  
30 Flächenabschnitte induzierter Absorption entlang der gewünschten Trennlinie aneinanderzureihen. Die im Anspruch 11 angesprochene Rissbildung ist dabei (im Gegensatz zur erfindungsgemäßen wesentlichen, induzierten Rissbildung) als Querriss, also als eine laterale Rissbildung in einer in der Ebene des Substrats  
35

liegenden Richtung zu verstehen (entsprechend des Verlaufs der Linie, entlang derer das Substrat aufgetrennt werden soll).

5 Vorteilhafte Weiterbildungen einer erfindungsgemäßen Vorrichtung gemäß Anspruch 12, die insbesondere verschiedene mögliche Ausgestaltungsformen der optischen Anordnung zum Erzeugen und Positionieren der Laserstrahl-  
brennfläche beschreiben, lassen sich den abhängigen Ansprüchen 13 bis 17 entnehmen; siehe dazu auch die nachfolgenden Ausführungsbeispiele bzw. die Figuren 4 bis 7. Eine erfindungsgemäße Vorrichtung kann dabei sowohl die  
10 optische Anordnung als auch das relativ dazu zu positionierende Substrat umfassen.

Anstelle der gemäß der Ansprüche 13, 14 und 16 verwendeten Blende kann auch eine Apertur verwendet werden bzw. die Blende kann auch als Apertur  
15 ausgeformt sein. Auch ist es möglich anstelle der Blende ein diffraktives Element (mit definierten Kantenintensitäten) zu verwenden bzw. die Blende als diffraktives Element (mit definierten Kantenintensitäten) auszuformen. (Neben normalen Blenden können auch diffraktive Strahlformer zur Erzeugung eines Linienfokus mit dem Axikon kombiniert werden.)

20 Gemäß Anspruch 17 bedeutet das Ablenken der beiden Strahlenbündel, dass die beiden Strahlenbündel in sich gesehen jeweils parallel ablenkbar sind und als Ganzes gesehen aufeinander zu gelenkt werden.

25 Wesentliche erfindungsgemäße Verwendungen lassen sich Anspruch 18 entnehmen.

Die vorliegende Erfindung weist im Vergleich zu den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren bzw. Vorrichtungen eine Reihe wesentlicher  
30 Vorteile auf.

Zunächst erfolgt gemäß der Erfindung die Schnittbildung ohne Partikelbildung, ohne Schmelzränder, mit minimaler Rissbildung am Rand, ohne merklichen Schnittspalt (somit ohne Verlust an Material des Substrats) und mit geraden  
35 Schnittkanten.

Erfindungsgemäß ist keine sehr hohe mittlere Laserleistung notwendig, trotzdem lassen sich vergleichsweise hohe Trenngeschwindigkeiten erzielen. Wesentlich ist dabei, dass die Erfindung pro Laserpuls (oder pro Burstimpuls) eine Laserstrahlbrennfläche (und nicht lediglich einen nicht bzw. nur sehr lokal ausgedehnten Brennpunkt) erzeugt. Dazu werden die nachfolgend noch im einzelnen dargestellten Laseroptiken eingesetzt. Die Brennfläche bestimmt so die Zone der Wechselwirkung zwischen Laser und Substrat. Fällt die Brennfläche zumindest abschnittsweise (in Tiefenrichtung gesehen) in das zu trennende Substratmaterial, so können die Laserparameter so gewählt werden, dass eine Wechselwirkung mit dem Material stattfindet, die erfindungsgemäß Risszonen entlang der gesamten Brennflächentiefe und über die gesamte Brennflächenbreite erzeugt. Wählbare Laserparameter sind beispielsweise die Wellenlänge des Lasers, die Impulsdauer des Lasers und die Pulsenergie des Lasers.

Weitere Vorteile, die das erfindungsgemäße Verfahren gegenüber beispielsweise dem mechanischen Ritzen und Brechen aufweist sind neben der fehlenden (oder zumindest minimalen) Partikelbildung, dass sich im Gegensatz zu einer mechanischen Ritzlinie ein hohes Aspektverhältnis (Verhältnis der Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche in Tiefenrichtung zur Ausdehnung in die zweite Richtung) erzielen lässt. Während beim mechanischen Ritzen und Brechen die Bruchlinie in das Material hinein über weitgehend unsteuerbares Risswachstum erzeugt wird, kann erfindungsgemäß ein Trennen unter einem sehr genau einstellbaren Winkel zur Substratnormalen erfolgen. Erfindungsgemäß sind auch Schrägschnitte ohne weiteres möglich.

Auch ist eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit auch bei dickeren Substraten möglich.

Eine Ablation an der Oberfläche, Gratbildungen an der Oberfläche und Partikelbildungen werden vermieden (letzteres insbesondere wenn die Lage der Brennfläche relativ zum Substrat so eingestellt wird, dass das erfindungsgemäße Verfahren von der Oberfläche des Substrats ausgehend ins Innere des Substrats für die erfindungsgemäße ausgedehnte induzierte Absorption und die Rissbildungen sorgt). In diesem Fall findet somit die erste (gewollte) Beschädigung direkt an der Oberfläche statt und setzt sich auf definierte Art

und Weise entlang der Rissbildungszone durch induzierte Absorption in die Substrattiefe fort.

5 Erfindungsgemäß lassen sich unterschiedliche Materialien, insbesondere Saphirscheiben, Halbleiterwafer, ... bearbeiten.

Auch können bereits beschichtete Materialien (z.B. TCO beschichtet) oder auch einseitig nicht transparent bedruckte Substrate erfindungsgemäß bearbeitet und aufgetrennt werden.

10

Erfindungsgemäß ist ein Schneiden praktisch ohne Schnittpalt möglich: Lediglich eine Materialschädigung wird erzeugt, die in der Regel im Bereich zwischen 1 und 10  $\mu\text{m}$  Ausdehnung liegt. Dabei wird insbesondere kein Schnittverlust in Bezug auf Material oder Fläche generiert. Dies ist insbesondere beim Schneiden von Halbleiterwafern vorteilhaft, da Schnittpaltverluste die aktiv nutzbare Fläche des Wafers verringern würden. Durch das erfindungsgemäße Verfahren des Brennflächenschneidens ergibt sich somit eine erhöhte Flächenausbeute.

15

20

Das erfindungsgemäße Verfahren kann insbesondere auch im Inline-Betrieb von Produktionsprozessen eingesetzt werden. Besonders vorteilhaft geschieht dies bei Produktionsprozessen, die in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren ablaufen.

25

Erfindungsgemäß können Einzelpulslaser ebenso eingesetzt werden, wie Laser, die Burstimpulse generieren. Grundsätzlich ist auch der Einsatz von Lasern im Dauerstrichbetrieb denkbar.

Folgende spezifische Anwendungsgebiete ergeben sich beispielhaft:

30

1. Auftrennen von Saphir-LED mit der Möglichkeit den Saphirwafer ganz oder teilweise zu schneiden. Dabei kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die Metallschicht ebenfalls mit durchtrennt werden, dies in einem einzigen Schritt.

35

2. Das Auseinzeln von Halbleiterwafern ist möglich, ohne das Tape zu be-

schädigen. Dazu wird die Brennfläche nur teilweise ins Innere des Substratmaterials gelegt, sodass sie an der Oberfläche beginnt und vor der getapten Folie (auf der dem Laser abgewandten rückseitigen Oberfläche des Substrats) aufhört: Beispielsweise ca. 10 % des Materials werden nicht getrennt. Die Folie bleibt somit intakt weil die Brennfläche vor der Folie „stoppt“. Der Halbleiterwafer kann dann nachfolgend über mechanische Kräfte (oder thermische Kräfte, z.B. mittels CO<sub>2</sub>-Laser) über die verbleibenden 10 % separiert werden.

5

10

3. Schneiden von beschichteten Materialien: Beispiele sind hier Bragg-Reflektoren (DBR) oder auch metallbeschichtete Saphirwafer. Auch prozessierte Siliziumwafer, auf welche bereits die aktiven Metall- oder Metalloxidschichten aufgebracht worden sind, können erfindungsgemäß geschnitten werden.

15

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung nun anhand einiger auf dem Vorbeschriebenen aufbauenden Ausführungsbeispielen beschrieben. Dabei zeigen:

20

Fig. 1 das Prinzip der erfindungsgemäßen Erzeugung einer Laserstrahlbrennfläche, mit der die erfindungsgemäße Bearbeitung eines für die Laserwellenlänge transparenten Substratmaterials (hier: Siliziumsubstrat) aufgrund der induzierten Absorption im Bereich der Laserstrahlbrennfläche erfolgen kann,

25

Fig. 2 die erfindungsgemäße Positionierung der Laserstrahlbrennfläche im Substrat im Detail,

30

Fig. 3 unterschiedliche Möglichkeiten der Bearbeitung des Substrats durch unterschiedliche Positionierung der Laserstrahlbrennfläche relativ zum Substrat,

Fig. 4 eine erste erfindungsgemäß verwendbare optische Anordnung,

35

Fig. 5 eine zweite erfindungsgemäß verwendbare optische Anordnung,

Fig. 6 eine dritte erfindungsgemäß verwendbare optische Anordnung,

5 Fig. 7 die erfindungsgemäße Auftrennung eines Substrats entlang  
schmaler Kanäle 1k zwischen Funktionsbereichen 1-1, 1-2, ...  
der Substratoberfläche.

10 Figuren 1 und 2 skizzieren die grundlegende Vorgehensweise des erfindungs-  
gemäßen Bearbeitungsverfahrens. Ein vom nicht gezeigten Laser 3 emittierter  
Laserstrahl 2a wird auf die optische Anordnung 6 eingestrahlt (von dieser ist  
in Figur 1c lediglich die die Strahlenbündel des Laserstrahls 2a auf das Substrat  
1 fokussierende, plankonvexe Kollimationslinse 11 gezeigt – vgl. auch die in  
den nachfolgenden Figuren 4 bis 6 beschriebenen Ausführungsbeispiele).

15 Figur 1a zeigt (in Aufsicht auf die Substratebene bzw. die x-y-Ebene senkrecht  
zur Einstrahlrichtung z), was ohne erfindungsgemäß wesentliche Strahlfor-  
mung durch die nachfolgend noch beschriebenen Elemente 8, 7 und 13 der  
erfindungsgemäßen optischen Anordnungen passieren würde: Aus dem  
eingestrahnten Laserstrahl 2a würde strahlausgangsseitig über einen definier-  
20 ten Ausdehnungsbereich entlang der Strahlrichtung (Längsrichtung l bzw.  
Einstrahlrichtung z) lediglich eine ausgedehnte Laserstrahlbrennlinie erzeugt  
werden. Diese ist hier mit dem Bezugszeichen 2b bezeichnet. Die Laserstrahl-  
brennlinie 2b (deren Durchmesser in der Substratebene x-y beispielsweise  
durch die volle Breite bei halbem Maximalintensitätswert im Strahlquerschnitt  
25 definiert werden kann) wird senkrecht zur Strahlrichtung z bzw. radial vom  
Zentrum der Laserstrahlbrennlinie 2b nach außen gesehen von einem Bereich  
abfallender Strahlintensität, der nachfolgend als Halobereich bezeichnet wird,  
umgeben. Der Halobereich, dessen radiale Ausdehnung senkrecht zur Strahl-  
richtung z hier mit dem Bezugszeichen a versehen ist, kann beispielsweise als  
30 derjenige Bereich definiert werden, in dem die Intensität im Laserstrahl 2a auf  
ein Hundertstel (oder auch z. B. auf ein Tausendstel) der Maximalintensität in  
der Laserstrahlbrennlinie 2b (bzw. im Zentrum derselben) abfällt. Wie zu Fig. 7  
noch genauer beschrieben wird, kann die in den äußeren Randbereichen des  
Halos noch vorhandene Restintensität auf funktionalen Oberflächenbereichen  
35 des auszueinzelnden Substrats zu unerwünschten Beschädigungen oder  
Zerstörungen führen. Eines der erfindungsgemäßen Ziele ist daher das Ausbil-

den eines Strahlquerschnitts bzw. einer Haloform dergestalt, dass besagte Beschädigungen bzw. Zerstörungen verhindert werden können.

5 Die hierzu über die erfindungswesentlichen Elemente 8, 7 und 13 (vgl. Figuren 4 bis 6) bewirkte Strahlformung ist in den Figuren 1b und 1c sichtbar: Erfindungsgemäß wird anstelle einer eindimensionalen Brennlinie 2b eine sich über einen Flächenbereich erstreckende Laserstrahlbrennfläche 2f erzeugt, die sowohl längs der Strahlrichtung z gesehen als auch in genau eine erste Richtung y senkrecht zur Strahlrichtung z gesehen ausgedehnt ist, jedoch nicht  
10 eine zweite Richtung x, die sowohl senkrecht zur ersten Richtung y als auch zur Strahlrichtung z ist, ausgedehnt ist ( $x, y, z =$  kartesisches Koordinatensystem). Zumindest abschnittsweise diese Laserstrahlbrennfläche 2f der Laserstrahlung 2a überdeckend wird im Strahlengang nach der optischen Anordnung 6 das zu bearbeitende, flächige Substrat 1 positioniert. Das  
15 Bezugszeichen 1a bezeichnet die der optischen Anordnung 6 bzw. dem Laser 3 zugewandte Oberfläche des flächigen Substrats, das Bezugszeichen 1b die hierzu üblicherweise parallele, beabstandete rückseitige Oberfläche des Substrats 1. Die Substratdicke (senkrecht zu den Flächen 1a und 1b, also zur Substratebene gemessen) wird mit dem Bezugszeichen d bezeichnet; vgl.  
20 Figur 2.

Durch die nachfolgend noch im Detail beschriebene erfindungsgemäße Strahlformung wird der im Querschnitt in der Substratebene x-y gesehen vormals kreisförmige Halobereich (Figur 1a) in der Ausdehnung in die zweite Richtung x (relativ zur Ausdehnung senkrecht dazu und senkrecht zur Strahlrichtung z, also zur Ausdehnung in die erste Richtung y) stark reduziert. Im Zentrum des Halobereichs wird statt einer rotationssymmetrischen Brennlinie eine abgeplattete Brennfläche erzeugt. Die Ausdehnung des wie im Fall von Figur 1a definieren Halobereichs in die x-Richtung ist mit  $a_x$  bezeichnet, die Ausdehnung des Halobereiches in die y-Richtung mit  $a_y$ . Vorteilhafterweise ist  $a_x$  um mindestens den Faktor 10, bevorzugt um mindestens den Faktor 50, bevorzugt um mindestens den Faktor 100, kleiner als  $a_y$ .

Wie Figur 2a zeigt, ist hier das Substrat 1 senkrecht zur Strahlängsachse und somit zur im Raum durch die optische Anordnung 6 hinter derselben erzeugten Brennfläche 2f ausgerichtet (das Substrat steht senkrecht auf der Zeich-

nungsebene) und entlang der Strahlrichtung z gesehen relativ zur Brennfäche 2f so positioniert, dass die Brennfäche 2f in Strahlrichtung z gesehen vor der Oberfläche 1a des Substrats beginnt und vor der Oberfläche 1b des Substrats, also noch innerhalb des Substrats, endet. Die in beiden Raumrichtungen z und y ausgedehnte Laserstrahlbrennfäche 2f erzeugt somit (bei geeigneter Laserintensität im Bereich der der Laserstrahlbrennfäche 2f, die durch die Fokussierung des Laserstrahls 2 auf einen Abschnitt der Länge l und der Breite b, also durch einen Flächenfokus der Fläche  $l \cdot b$  sichergestellt wird) im Überdeckungsbereich der Brennfäche 2f mit dem Substrat 1, also im Material des Substrats das von der Brennfäche 2f überstrichen wird, einen entlang der Strahlrichtung z und über die Breitenrichtung y gesehen ausgedehnten Flächenabschnitt 2c, über den eine induzierte Absorption im Material des Substrats erzeugt wird, die entlang des Abschnitts 2c Rissbildungen im Material des Substrats induziert. Die Rissbildungen erfolgen dabei nicht nur lokal, sondern über die gesamte Fläche des ausgedehnten Abschnitts 2c der induzierten Absorption. Die Länge dieses Abschnitts 2c (also letztendlich die Länge der Überdeckung der Laserstrahlbrennfäche 2f mit dem Substrat 1 in z-Richtung) ist hier mit dem Bezugszeichen L versehen. Die Breite des Abschnitts 2c entspricht der Breite b der Brennfäche 2f. Die mittlere Ausdehnung des Abschnitts der induzierten Absorption (bzw. der Bereiche im Material des Substrats 1, die der Rissbildung unterzogen werden) in Richtung senkrecht zur Flächenausdehnung, also in x-Richtung gesehen, ist hier mit dem Bezugszeichen D bezeichnet. Diese mittlere Ausdehnung D entspricht der mittleren Ausdehnung der Laserstrahlbrennfäche 2f in x-Richtung.

Wie Figur 2a zeigt, wird somit erfindungsgemäß für die Wellenlänge  $\lambda$  des Laserstrahls 2a transparentes Substratmaterial durch induzierte Absorption im Bereich der Brennfäche 2f erwärmt. Figur 2b skizziert, dass sich das erwärmte Material letztendlich ausdehnt, sodass eine entsprechend induzierte Spannung zur Mikrorissbildung gemäß der Erfindung führt, wobei die Spannung an der Oberfläche 1a am größten ist.

Nachfolgend werden konkrete optische Anordnungen 6, die zur Erzeugung der Brennfäche 2f eingesetzt werden können, beschrieben. Alle Anordnungen basieren dabei auf dem Vorbeschriebenen, sodass für identische oder sich in ihrer Funktion entsprechende Bauteile bzw. Merkmale jeweils identische

Bezugszeichen verwendet werden. Nachfolgend werden daher jeweils nur die Unterschiede beschrieben.

5 Da die letztendlich zur Separation führende Trennfläche erfindungsgemäß von hoher Qualität (hinsichtlich Bruchfestigkeit, geometrischer Präzision, Rauigkeit und der Vermeidung von Nachbearbeitungserfordernissen) ist bzw. sein soll, sollten die einzelnen (genauer: durch einzelne Laserpulse erzeugten), entlang der Trennlinie 5 (vgl. Fig. 7) auf der Oberfläche des Substrats zu positionierenden Brennfleichen wie mit den nachfolgenden optischen Anordnungen beschrieben erzeugt werden (die optische Anordnung wird nachfolgend alternativ auch als Laseroptik bezeichnet). Die Rauigkeit ergibt sich dabei insbesondere aus der Ausdehnung  $D$  der Brennfleiche in  $x$ -Richtung. Um bei gegebener Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers 3 (Wechselwirkung mit dem Material des Substrats 1) eine geringe Ausdehnung  $D$  von beispielsweise  $0.5 \mu\text{m}$  bis  $2 \mu\text{m}$  erreichen zu können, sind in der Regel bestimmte Anforderungen an die numerische Apertur der Laseroptik 6 zu stellen. Diese Anforderungen werden durch die nachfolgend beschriebenen Laseroptiken 6 erfüllt.

10

15

Figur 3 zeigt für alle nachfolgend beschriebenen optischen Anordnungen 6, dass die Laserstrahlbrennfläche  $2f$  durch geeignete Positionierung und/oder Ausrichtung der optischen Anordnung 6 relativ zum Substrat 1 sowie durch geeignete Wahl der Parameter der optischen Anordnung 6 unterschiedlich positioniert werden kann: Wie die erste Zeile aus Figur 3 skizziert, kann die Länge  $l$  der Brennfleiche  $2f$  so eingestellt werden, dass sie die Substratdicke  $d$  (hier um den Faktor 2) übertrifft. Platziert man das Substrat 1 somit in Strahl-längsrichtung  $z$  gesehen mittig zur Brennfleiche  $2f$ , so wird ein ausgedehnter Abschnitt induzierter Absorption  $2c$  über die gesamte Substratdicke  $d$  erzeugt.

20

25

Im in Figur 3b zweite Zeile gezeigten Fall wird eine Brennfleiche  $2f$  der Länge  $l$  erzeugt, die in etwa der Ausdehnung des Substrats  $d$  entspricht. Da das Substrat 1 relativ zur Fläche  $2f$  so positioniert wird, dass die Fläche  $2f$  in einer Linie vor, also außerhalb des Substrats beginnt, ist die Länge  $L$  des ausgedehnten Abschnitts induzierter Absorption  $2c$  (der sich hier von der Oberfläche des Substrats bis in eine definierte Substrattiefe, jedoch nicht bis zur rückseitigen Oberfläche  $1b$  erstreckt) hier kleiner als die Länge  $l$  der Brennfleiche  $2f$ . Die dritte Zeile in Figur 3b zeigt den Fall, bei dem das Substrat 1 entlang der

30

35

Strahlrichtung z gesehen partiell vor dem Beginn der Brennfläche 2f positioniert wird, sodass auch hier für die Länge l der Brennfläche  $l > L$  gilt (L = Ausdehnung des Abschnitts induzierter Absorption 2c im Substrat 1). Die Brennfläche beginnt somit im Inneren des Substrats und erstreckt sich über die rückseitige Oberfläche 1b bis außerhalb des Substrats. Die vierte Zeile in Figur 3b zeigt schließlich den Fall, bei dem die erzeugte Brennflächenlänge l kleiner als die Substratdicke d ist, sodass – bei zentrischer Positionierung des Substrats relativ zur Brennfläche in Einstrahlrichtung gesehen – die Brennfläche hier nahe der Oberfläche 1a im Inneren des Substrats beginnt und näher der Oberfläche 1b im Inneren des Substrats endet ( $l = 0.75 \cdot d$ ).

Erfindungsgemäß ist es dabei besonders vorteilhaft, die Brennflächenpositionierung so zu realisieren, dass mindestens eine der Oberflächen 1a, 1b von der Brennfläche überstrichen wird, der Abschnitt der induzierten Absorption 2c somit an mindestens einer Oberfläche beginnt. Auf diese Art und Weise lassen sich, durch Vermeidung von Ablation, Grat- und Partikelbildung an der Oberfläche, nahezu ideale Schnitte erzielen.

Die in Figuren 4 und 5 gezeigten optischen Anordnungen basieren auf der Grundidee, zur Bildung der Brennfläche 2f zunächst eine Optik (Element 9) mit einer nicht-sphärischen Freifläche einzusetzen, die so geformt ist, dass eine Brennfläche definierter Länge l gebildet wird. Hierzu können als optische Elemente 9 der optischen Anordnung 6 Asphären eingesetzt werden. Beispielsweise wird in den Figuren 4 und 5 ein sogenanntes Kegelprisma, das oft auch als Axicon bezeichnet wird, eingesetzt. Ein Axicon ist eine spezielle, konisch geschliffene Linse, die eine Punktquelle auf eine Linie entlang der optischen Achse bildet (oder auch einen Laserstrahl ringförmig transformiert). Der Aufbau eines solchen Axicons ist dem Fachmann grundsätzlich bekannt; der Kegelwinkel beträgt hier beispielsweise  $10^\circ$ . Das hier mit dem Bezugszeichen 9 bezeichnete Axicon ist mit seiner Kegelspitze entgegen der Einstrahlrichtung (hier: -z-Richtung) ausgerichtet und auf die Strahlmitte zentriert. Im Strahlengang nach der Freiflächenoptik wird eine weitere Optik eingesetzt (Element 7 bzw. 8), die die Ausdehnung des Strahlenbündels der Laserstrahlung 2a in die zweite Richtung x verringert, das Strahlenbündel in x-Richtung somit einschnürt.

Figur 4 zeigt ein erstes Beispiel für eine erfindungsgemäße Vorrichtung samt optischer Anordnung 6 zum Ausbilden einer in der y-z-Ebene ausgedehnten Laserstrahlbrennfläche 2f (optische Achse 6z der Anordnung 6 bzw. der Vorrichtung und Einstrahlrichtung in -z -Richtung). Im Strahlengang des Lasers 3 (nicht gezeigt), dessen Laserstrahl mit 2a bezeichnet ist, ist entlang der Einstrahlrichtung gesehen zunächst ein optisches Element mit einer nicht-sphärischen Freifläche, die zum Ausbilden einer in die z-Richtung ausgedehnten Laserstrahlbrennlinie ausgeformt ist, positioniert. Dieses optische Element ist hier ein Axicon 9 mit 5° Kegelwinkel, das senkrecht zur Strahlrichtung und auf den Laserstrahl 2a zentriert positioniert ist. Die Kegelspitze des Axicons 9 zeigt dabei entgegen der Einstrahlrichtung. In Strahlrichtung im Abstand  $z1'$  vom Axicon 9 ist ein kollimierendes optisches Element, hier eine plankonvexe Kollimationslinse 12, deren plane Fläche in Strahlrichtung -z zeigt, so angeordnet, dass die auf die plankonvexe Kollimationslinse 12 einfallende Laserstrahlung kollimiert, also parallel ausgerichtet wird. Der Abstand  $z1'$  der plankonvexen Kollimationslinse 12 vom Axicon 9 ist hier mit ca. 300 mm so gewählt, dass das vom Axicon 9 geformte Laserstrahlbündel ringförmig auf den außen liegenden Bereichen der Linse 12 auftrifft. Somit wird durch die Linse 12 radial beabstandet von der optischen Achse 6z der Vorrichtung ein parallel zur optischen Achse 6z verlaufendes, ringförmiges Strahlenbündel 2r erzeugt.

Strahlausgangsseitig der Linse 12 ist im Abstand  $z1$  mit  $z1 > z1'$  (hier:  $z1 = 1.3 \times z1'$ ) eine eindimensionale Spaltblende 8 positioniert. Die Spaltblende 8 ist mit ihrer Vorzugsrichtung (d. h. der Spaltrichtung) in die erste Richtung, also die y-Richtung, ausgerichtet. Die Spaltblende (nachfolgend alternativ auch als Schlitzblende bezeichnet) 8 ist dabei so positioniert, dass die optische Achse 6z in die zweite Richtung x gesehen mittig zwischen den beiden Spalt-rändern verläuft. Die Spaltbreite ist so gewählt, dass sie mit dem Innendurchmesser  $2i$  des ringförmigen Strahlenbündels 2r ausgangsseitig der Linse 12 korrespondiert: Wie Figur 4a zeigt, werden somit entlang einer in x-Richtung sowie durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden Anteile des ringförmigen Strahlenbündels 2r durch das für Laserstrahlung der verwendeten Wellenlänge intransparente Material der Ränder der Schlitzblende 8 abgeschattet. Aufgrund der Eindimensionalität der Schlitzblende 8 erreichen jedoch entlang einer in y-Richtung und durch die

optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden Strahlungsanteile im Strahlenbündel 2r ungehindert den Raum ausgangseitig der Schlitzblende 8 (vgl. Figur 4b).

5 Strahlausgangseitig der Blende 8 und beabstandet von dieser ist zentriert um die optische Achse 6z eine weitere plankonvexe Kollimationslinse 11, die hier als Fokussierlinse dient, positioniert: Diese fokussiert sämtliche nicht durch die Blende 8 abgeschatteten Strahlanteile des vormals ringförmigen Strahlbündels 2r in die erste y und in die zweite x Richtung auf das strahlausgangseitig dieser Linse 11 senkrecht zur optischen Achse 6z, also in der x-y-Ebene, angeordnete flächige Substrat 1. Die Linse 11 (deren plane Seite dem Substrat 1 zugewandt ist) fokussiert somit die nicht von der Blende 8 abgeschotteten Strahlanteile des vormals ringförmigen Strahlbündels 2r in einem definierten Abstand von der Linse 11 auf eine zweidimensionale Laserstrahlbrennfläche 2f mit definierter Ausdehnung in die z-Richtung (durch die Wirkung des Axicons 9) wie auch mit definierter Ausdehnung in die y-Richtung (durch die Wirkung der Blende 8); siehe hierzu die in Figur 1b gezeigte Strahlformung. Die effektive Brennweite der Linse 11 beträgt hier 25 mm, so dass die Laserstrahlbrennfläche 2f etwa im Abstand von 20 mm von der Linse 11 entsteht (dort wird das Substrat 1 positioniert).

Die optischen Eigenschaften der die rotationssystemmetrischen und auf der optischen Achse 6z positionierten Elemente 9, 12 und 11 sowie die Blende 8 umfassenden optischen Anordnung 6 (insbesondere die geometrischen Ausformungen der Elemente 9, 12, 8 und 11 sowie deren Positionierung relativ zueinander entlang der Hauptstrahlachse 6z) können dabei so gewählt werden, dass die Ausdehnung l der Laserstrahlbrennfläche 2f in z-Richtung doppelt so groß ist wie die Dicke d des Substrats in z-Richtung. Wird dann das Substrat 1 zentriert zur Brennfläche 2f positioniert (vgl. Figur 3, oberste Zeile), so erfolgt über die gesamte Substratdicke die Ausbildung des ausgedehnten Flächenabschnitts 2c induzierter Absorption. Die Ausdehnung l der Brennfläche 2f in z-Richtung kann über den Strahldurchmesser auf dem Axicon 9 eingestellt werden. Die numerische Apertur über die Brennfläche 2f kann eingestellt werden über den Abstand z1' des Axicons 9 von der Linse 12 sowie über den Kegelwinkel des Axicons 9. Auf diese Weise kann die gesamte Laserenergie in der Brennfläche 2f konzentriert werden.

Anstelle der in Figur 4 (sowie auch den Figuren 5 und 6, siehe nachfolgend) gezeigten plankonvexen Linsen 11, 12 können auch fokussierende Meniskuslinsen oder andere höher korrigierte Fokussierlinsen (Asphären, Mehrlinser) eingesetzt werden.

Figur 5 zeigt ein weiteres Beispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, das grundsätzlich wie das in Figur 4 gezeigte ausgebildet ist. Daher werden nachfolgend nur die Unterschiede beschrieben (die optische Anordnung 6 umfasst hier die rotationssymmetrischen, auf der Achse 6z zentrierten optischen Elemente 9 und 11 sowie eine Zylinderlinse 7).

Im Strahlengang 2a wird strahlausgangsseitig des Axicons 9 anstelle der Linse 12 in Figur 4 im Abstand von  $z_2$  entlang der optischen Achse 6z gesehen die plankonvexe, fokussierende Zylinderlinse 7 positioniert. Der Abstand  $z_2$  der Linse 7 vom Axicon kann dabei wie der Abstand  $z_1'$  in Figur 4 gewählt werden. Die plane Seite der Zylinderlinse 7, die in der x-y-Ebene positioniert wird, liegt auf der dem Axicon 9 abgewandten Seite. Die Vorzugsrichtung, also die Zylinderachsrichtung der Zylinderlinse 7, wird parallel zur x-Richtung ausgerichtet, und die Zylinderlinse 7 wird in Bezug auf die optische Achse 6z gesehen zentriert angeordnet. Der Abstand  $z_2$  und die Ausdehnungen der Linse 7 werden so gewählt, dass das vom Axicon 9 erzeugte, auf der Eingangsseite der Zylinderlinse 7 ringförmig divergierende Strahlbündel auf die äußeren Randbereiche der Zylinderlinse 7 fällt. Die Ausformung und Positionierung der Elemente 9, 7 erfolgt dabei so, dass entlang einer in x-Richtung und durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden, auf die Linse 7 auftreffenden Strahlanteile des ringförmig divergierenden Strahlbündels nicht abgelenkt werden (vgl. Figur 5a), wohingegen entlang einer in y-Richtung und durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden, auf die Linse 7 auftreffenden Strahlanteile dieses Strahlbündels durch die Zylinderlinse 7 kollimiert, also parallelgerichtet werden (Figur 5b).

In definiertem Abstand  $z_2'$  hinter der Zylinderlinse 7 ist im Strahlengang zentriert um die optische Achse 6z wie beim Ausführungsbeispiel der Figur 4 die fokussierende plankonvexe Kollimationslinse 11 positioniert. Der Abstand

5  $z_2'$  ist dabei so gewählt, dass entlang der in x-Richtung und durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden Strahlanteile 2x seitlich an der Linse 11 unabgelenkt vorbeigehen, wohingegen entlang der in y-Richtung und durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen Strahlanteile 2y durch die Linse 11 vollständig erfasst, abgelenkt und die betreffenden auf das strahlausgangsseitig der Linse 11 positionierte Substrat 1 fokussiert 2f werden.

10 Auch durch die Kombination des rotationssymmetrischen Axicons 9 mit der Zylinderlinse 7 sowie der anschließenden Fokussierung durch die rotationssymmetrische plankonvexe Kollimationslinse 11 lässt sich somit die Strahlformung aus Figur 1b realisieren. Die Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche 2f in y-Richtung und in z-Richtung wird dabei wie folgt eingestellt:

- 15 - Verschiebung Abstand Werkstück 1 zu Fokussierlinse 11
- Ändern der Fokuslänge der Fokussierlinse 11
- Ausleuchtung Axicon 9.

20 Ein weiteres Beispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Erzeugen einer ausgedehnten Brennfläche 2f zeigt Figur 6.

25 Im Strahlengang 2a des Lasers 3 (nicht gezeigt) ist zunächst ein nicht-rotationssymmetrisches, mit einer Vorzugsrichtung (hier: x-Richtung) versehenes optisches Element 13 positioniert. Dieses ist als auf der Strahleingangsseite ablenkendes, auf der Strahlausgangsseite planes Element, das auf der optischen Achse 6z zentriert wird, ausgebildet. Die plane Seite weist also zum Substrat 1 hin. Die der planen Seite gegenüberliegende (also zum Laser 3 hin weisende), ablenkende Seite ist als spitzdachförmiger Doppelkeil ausgebildet, dessen zentraler Grat entlang der x-Richtung und durch die optische Achse 6z verläuft. Das Element 13 wird nachfolgend vereinfacht auch als Doppelkeil bezeichnet.

35 Wie Figur 6a zeigt, werden somit entlang einer in x-Richtung sowie durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen die betreffenden Strahlanteile des Strahlenbündels 2a durch den Doppelkeil 13 lediglich transmittiert, nicht jedoch abgelenkt. Senkrecht dazu, also entlang einer in y-Richtung und durch die optische Achse 6z verlaufenden Geraden gesehen, werden die

betreffenden, beidseits der optischen Achse 6z gelegenen Teilstrahlenbündel durch die Doppelkeilstruktur in sich jeweils parallel sowie als Ganzes gesehen aufeinander zu abgelenkt (Figur 6b): Sämtliche sich im Halbraum  $y_1$  oberhalb einer parallel zur x-z-Ebene und durch die optische Achse 6z verlaufenden Ebene befindliche Strahlanteile  $s_1$  des auf den Doppelkeil 13 eingestrahnten Strahlenbündels 2a werden somit parallel und hin zum gegenüberliegenden Halbraum  $y_2$  (unterhalb besagter Ebene parallel zur x-z-Ebene und durch die optische Achse 6z verlaufend) abgelenkt. Umgekehrt werden sämtliche unterhalb besagter Ebene auf den Keil 13 einfallende Strahlanteile  $s_2$  des Strahlenbündels 2a aus dem Halbraum  $y_2$  parallel und zum Halbraum  $y_1$  hin abgelenkt.

In Strahlrichtung gesehen beabstandet vom Keil 13 (hinter dem Kreuzungspunkt der beiden Strahlanteile  $s_1$  und  $s_2$ ) ist wie im Beispiel von Figur 5 eine Zylinderlinse 7 positioniert: In x-Richtung gesehen wird durch diese keine Ablenkung der Strahlanteile  $s_1$  und  $s_2$  vorgenommen und in y-Richtung gesehen werden durch diese die beiden Strahlanteile  $s_1$  und  $s_2$  zur Achse 6z hin abgelenkt und kollimiert (beide Strahlanteile  $s_1$  und  $s_2$  verlaufen strahl- ausgangsseitig der Linse 7 parallel zur Achse 6z).

In Strahlrichtung gesehen hinter der Zylinderlinse 7, also in einem definierten Abstand  $z_3$  strahl- ausgangsseitig des Doppelkeils 13 ist (wie in den Beispielen aus den Figuren 4 und 5) die plankonvexe Kollimationslinse 11 positioniert. Diese ist ebenso wie in den vorangehenden Beispielen beschrieben ausgebildet und zentriert auf der Achse 6z angeordnet. Der Abstand  $z_3$  wird so gewählt, dass die beiden in Einstrahlrichtung ( $-z$ -Richtung) gesehen parallel voneinander weg divergierenden, nach der Linse 7 parallel gerichteten Strahlenbündel  $s_1$  und  $s_2$  in y-Richtung gesehen auf außen liegende Randbereiche der Kollimationslinse 11 auftreffen. Die Linse 11 fokussiert die beiden Strahlenbündel  $s_1$  und  $s_2$  somit auf eine in der y-z-Ebene ausgedehnte Laserstrahl- brennfläche  $2f$ , in der, wie bei den anderen Ausführungsbeispielen beschrieben, das zu bearbeitende Substrat 1 positioniert wird. Auch mit einer die Elemente 11, 7 und 13 umfassenden optischen Anordnung 6 kann somit die Strahlformung gemäß Figur 1b realisiert werden.

Figur 7 skizziert in Aufsicht auf die Substratebene (x-y-Ebene) eine erfindungsgemäß mögliche Bearbeitung eines bereits mit Funktionsstrukturen 1-1, 1-2, 1-3 und 1-4 versehenen Halbleitersubstrats 1. Die hier in Quadrantenform angeordneten Funktionsstrukturen 1-1, ... dürfen beim Auseinzeln keiner Laserbestrahlung unterworfen werden (es muss somit insbesondere auch verhindert werden, dass der in den Figuren 1a und 1b gezeigte, mit den Bezugszeichen a bzw.  $a_x$ ,  $a_y$  angedeutete Halobereich H des Laserstrahls beim Auseinzeln die besagten Funktionsbereiche überstreicht). Eine Lasereinstrahlung darf somit ausschließlich auf den sich zwischen den Funktionsbereichen erstreckenden kanalförmigen Strukturen 1k, die keinerlei Funktionsstrukturen aufweisen und daher laserbestrahlt werden dürfen, erfolgen.

Wie Figur 7 andeutet, kann mit einer gemäß Figur 1b erzeugten, an die Breite der Kanäle 1k angepassten Laserstrahlbrennfläche 2f gearbeitet werden: Die Vorschubrichtung des Laserstrahls 2a über das Substrat 1 wird genau parallel zu einer Kanallängsachse gelegt (hier: des in y-Richtung ausgerichteten vertikal verlaufenden Kanals 1k). Gleichzeitig wird die Laserstrahlbrennfläche 2f senkrecht zur Substratebene (x-y-Ebene) und parallel zur Vorschubrichtung erzeugt. Somit erfolgt z. B. im in Figur 4 gezeigten Fall (die dem Fachmann an sich bekannte, z. B. auf Basis von Galvanometerscannern realisierbare Ablenkungsoptik ist in den Ausführungsbeispielen der Figuren 4 bis 7 nicht gezeigt) ein Vorschub des Laserstrahls 2a entlang einer Linie 5 (die einer gewünschte Trennlinie, entlang derer das Substrat aufgetrennt werden soll, entspricht) so, dass eine Vielzahl 2c-1, 2c-2, ... ausgedehnter Flächenabschnitte 2c induzierter Absorption (vgl. Figur 3) erzeugt wird. Dabei entspricht jeder Abschnitt induzierter Absorption 2c-1, ... einer durch einen einzigen Laserpuls des gepulsten Lasers im Substratmaterial entlang der Trennlinie 5 erzeugten Störungszone.

Da die einzelnen Störungszone 2c-1, ... in der Mitte des Kanals 1k erzeugt werden und diese bzw. die Laserstrahlbrennflächen 2f jeweils parallel zu den Rändern der Funktionsstrukturen 1-1, ... verlaufen, kann durch geeignete Wahl der optischen Parameter sichergestellt werden, dass die die Brennfläche 2f umgebende Halozone H in x-Richtung einen wesentlich geringeren Durchmesser aufweist als in y-Richtung. Die Ausdehnung der Halozone H in x-

Richtung wird dabei so gewählt, dass sie kleiner ist als die Kanalbreite des Kanals 1k.

5 Die Wiederholrate der Laserpulse wird so mit der Vorschubgeschwindigkeit des Lasers koordiniert, dass der mittlere Abstand A unmittelbar benachbarter, also durch zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgende Laserpulse erzeugter ausgedehnter Flächenabschnitte 2c induzierter Absorption geringfügig (z. B. um den Faktor 1.1) größer ist als die Breite b der Laserstrahlbrennfläche 2f in Vorschubrichtung bzw. y-Richtung. Somit erfolgt ohne Intensitätsüberlappung  
10 ein Einbringen einer Vielzahl unmittelbar aneinandergesetzter Störungsstrukturen 2c entlang der Kanalachse 1k bzw. der gewünschten Trennlinie 5 und somit ein effizientes Auftrennen des Substrats 1 entlang solcher Kanäle 1k. Die zwischen zwei benachbarten Störungsstrukturen 2c noch verbleibenden, hier als Lücken erkennbaren Substratresten können ohne weiteres durch  
15 Einwirken mechanischer Kräfte und/oder thermischer Spannungen Rissbildungen bewirkt werden, um die beidseits der Trennlinie 5 erzeugten Substratbruchstücke endgültig voneinander abzulösen.

## Patentansprüche

5

1. Verfahren zum laserbasierten Bearbeiten eines flächigen, kristallinen Substrats, um das Substrat in mehrere Teile zu trennen,

bei dem der Laserstrahl (2a, 2f) eines Lasers (3) zum Bearbeiten des Substrats (1) auf letzteres gerichtet wird,

10

bei dem mit einer im Strahlengang des Lasers (3) positionierten optischen Anordnung (6) aus dem auf letztere eingestrahlten Laserstrahl (2a) strahlausgangsseitig der optischen Anordnung (6) eine sowohl längs der Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau eine erste Richtung (y) senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnte, jedoch nicht in eine zweite Richtung (x), die sowohl senkrecht zur ersten Richtung (y) als auch zur Strahlrichtung (z) ist, ausgedehnte Laserstrahlbrennfläche (2f) geformt wird,

15

wobei das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche (2f) so positioniert wird, dass die Laserstrahlbrennfläche (2f) im Inneren des Substrats (1) entlang eines ausgedehnten Flächenabschnitts (2c) des Substratmaterials eine induzierte Absorption erzeugt, durch die entlang dieses ausgedehnten Flächenabschnitts (2c) induzierte Rissbildungen im Substratmaterial erfolgen.

20

2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch

25

*dadurch gekennzeichnet, dass*

das flächige, kristalline Substrat folgendes ist oder umfasst:

- Ein Halbleitersubstrat, insbesondere ein 4-6 oder 3-5-Halbleitersubstrat, bevorzugt ein GaAs-Substrat, oder ein elementares Halbleitersubstrat, bevorzugt ein Si-Substrat,

- ein Isolatorsubstrat, insbesondere ein Oxid, bevorzugt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Saphir) oder  $\text{SiO}_2$  (Quarz), oder ein Fluorid, bevorzugt  $\text{CaF}_2$  oder  $\text{MgF}_2$ , oder ein Chlorid, bevorzugt  $\text{NaCl}$ , oder ein Nitrid, bevorzugt  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oder  $\text{BN}$ ,

5 und/oder

- ein Substrat enthaltend oder bestehend aus mindestens ein(em) kohlenstoffbasierten/s Material mit kristalliner oder quasi-kristalliner Grundordnung, insbesondere enthaltend oder bestehend aus Kohlenstoffnanoröhren.

10 3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche

*dadurch gekennzeichnet, dass*

die nachfolgend als Länge  $l$  bezeichnete Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche ( $2f$ ) in Strahlrichtung ( $z$ ) um mindestens das 10-fache, bevorzugt um mindestens das 20-fache, bevorzugt um mindestens das 50-fache, bevorzugt um mindestens das 100-fache, größer ausgebildet wird als die Ausdehnung  $D$  der Laserstrahlbrennfläche ( $2f$ ) in die zweite Richtung ( $x$ )

15

und/oder

dass die nachfolgend als Breite  $b$  bezeichnete Ausdehnung der Laserstrahlbrennfläche ( $2f$ ) in die erste Richtung ( $y$ ) um mindestens das 5-fache, bevorzugt um mindestens das 10-fache, bevorzugt um mindestens das 50-fache, bevorzugt um mindestens das 100-fache, größer ausgebildet wird als die Ausdehnung  $D$  der Laserstrahlbrennfläche ( $2f$ ) in die zweite Richtung ( $x$ ).

20

25 4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche ( $2f$ ) so positioniert wird, dass sich in Strahlrichtung ( $z$ ) gesehen der ausgedehnte Flächen-

abschnitt (2c) der induzierten Absorption im Material, also im Inneren des Substrats (1), bis zu mindestens einer der beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen (1a, 1b) erstreckt.

5. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch,

5 *dadurch gekennzeichnet, dass*

das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche (2f) so positioniert wird, dass sich in Strahlrichtung (z) gesehen der ausgedehnte Flächenabschnitt (2c) der induzierten Absorption im Material, also im Inneren des Substrats (1), von einer (1a) der beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen bis hin zur anderen (1b) der beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen, also über die gesamte Schichtdicke  $d$  des Substrats (1), erstreckt

oder

15 dass das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche (2f) so positioniert wird, dass sich in Strahlrichtung (z) gesehen der ausgedehnte Flächenabschnitt (2f) der induzierten Absorption im Material, also im Inneren des Substrats (1), ausgehend von einer (1a) der beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen in das Substrat (1) hinein, jedoch nicht bis hin zur anderen (1b) der beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen, also nicht über die gesamte Schichtdicke  $d$  des Substrats (1), erstreckt, bevorzugt über 80% bis 98%, bevorzugt über 85% bis 95%, besonders bevorzugt über 90% dieser Schichtdicke erstreckt.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

25 *dadurch gekennzeichnet, dass*

die induzierte Absorption so erzeugt wird, dass die Rissbildung im Gefüge des Substrats (1) ohne Ablation und ohne Aufschmelzen von Material des Substrats (1) erfolgt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

die Länge  $l$  der Laserstrahlbrennfläche (2f) zwischen 0.2 mm und 10 mm, bevorzugt zwischen 0.5 mm und 2 mm, beträgt,

und/oder

5 dass die Breite  $b$  der Laserstrahlbrennfläche (2f) zwischen 0.02 mm und 2.5 mm, bevorzugt zwischen 0.05 mm und 0.2 mm, beträgt,

und/oder

10 dass die Schichtdicke  $d$  des Substrats (1), gemessen senkrecht zu den beiden sich gegenüberliegenden Substratoberflächen (1a, 1b), zwischen  $2\ \mu\text{m}$  und  $3000\ \mu\text{m}$ , bevorzugt zwischen  $100\ \mu\text{m}$  und  $500\ \mu\text{m}$ , beträgt,

und/oder

15 dass das Verhältnis  $V1=l/d$  aus der Länge  $l$  der Laserstrahlbrennfläche (2f) und der Schichtdicke  $d$  des Substrats (1) zwischen 10 und 0.5, bevorzugt zwischen 5 und 2, beträgt

und/oder

dass die Ausdehnung  $D$  der Laserstrahlbrennfläche (2f) in die zweite Richtung (x) zwischen  $1\ \mu\text{m}$  und  $50\ \mu\text{m}$ , bevorzugt zwischen  $5\ \mu\text{m}$  und  $25\ \mu\text{m}$  beträgt.

20 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

als Laser (3) ein gepulster Laser verwendet wird,

und/oder

25 dass die Impulsdauer  $\tau$  des Lasers (3) so gewählt wird, dass innerhalb der Wechselwirkungszeit mit dem Material des Substrats (1) die Wär-

- 5 mediffusion in diesem Material vernachlässigbar ist, bevorzugt keine Wärmediffusion erfolgt, wozu bevorzugt  $\tau$ , F als Flächenausdehnung der Laserstrahlbrennfläche (2f) und die Wärmediffusionskonstante  $\alpha$  des Materials des Substrats (1) gemäß  $\tau \ll F/\alpha$  eingestellt werden und/oder bevorzugt  $\tau$  kleiner als 10 ns, bevorzugt kleiner als 100 ps, gewählt wird,
- und/oder
- 10 dass die Pulswiederholfrequenz des Lasers (3) zwischen 10 kHz und 1000 kHz, bevorzugt 100 kHz, beträgt,
- und/oder
- 15 dass der Laser (3) als Einzelpulslaser oder als Burstpulslaser betrieben wird,
- und/oder
- 15 dass die mittlere Laserleistung, gemessen unmittelbar strahlausgangseitig des Lasers (3), zwischen 5 Watt und 100 Watt, bevorzugt zwischen 15 Watt und 30 Watt, beträgt.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
- dadurch gekennzeichnet, dass*
- 20 die Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers (3) so gewählt wird, dass das Material des Substrats (1) für diese Wellenlänge transparent ist oder im wesentlichen transparent ist, wobei unter letzterem verstanden wird, dass die längs der Strahlrichtung (z) erfolgte Intensitätsabnahme des Laserstrahls im Material des Substrats (1) je Millimeter Eindringtiefe 10% oder weniger beträgt,
- 25 wobei der Laser, insbesondere für im sichtbaren Wellenlängenbereich transparente Kristalle als Substrat (1), bevorzugt ein Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 1064 nm oder ein Y:YAG Laser mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 1030 nm, oder, insbesondere für im infraroten Wellen-

längenbereich transparente Halbleitersubstrate (1), bevorzugt ein Er:YAG Laser mit einer Wellenlänge  $\lambda$  zwischen 1.5  $\mu\text{m}$  und 2.1  $\mu\text{m}$  ist.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

5 der Laserstrahl (2a, 2f) relativ zur Oberfläche (1a) des Substrats (1) entlang einer Linie (5), bevorzugt entlang einer zur ersten Richtung (y) parallelen Linie (5), bewegt wird, entlang derer das Substrat (1) zum Erhalt mehrerer Teile zu durchtrennen ist, wobei entlang dieser Linie (5) eine Vielzahl (2c-1, 2c-2,...) ausgedehnter Flächenabschnitte (2c) induzierter Absorption im Inneren des Substrats (1) erzeugt werden,

10

wobei bevorzugt das Verhältnis  $V2=A/b$  aus dem mittleren Abstand A unmittelbar benachbarter, also direkt nacheinander erzeugter ausgedehnter Flächenabschnitte (2c) induzierter Absorption und der Breite b der Laserstrahlbrennfläche (2f) in die erste Richtung (y) zwischen 1.0 und 1.3, bevorzugt zwischen 1.0 und 1.1 ist.

15

11. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

während und/oder nach dem Erzeugen der Vielzahl (2c-1, 2c-2,...) ausgedehnter Flächenabschnitte (2c) induzierter Absorption im Inneren des Substrats (1) mechanische Kräfte auf das Substrat (1) ausgeübt werden und/oder thermische Spannungen in das Substrat (1) eingebracht werden, insbesondere das Substrat ungleichförmig erwärmt und wieder abgekühlt wird, um jeweils zwischen unmittelbar benachbarten (2c-1, 2c-2) ausgedehnten Flächenabschnitten (2c) induzierter Absorption eine Rissbildung zum Auftrennen des Substrats in die mehreren Teile zu bewirken.

20

25

12. Vorrichtung zum laserbasierten Bearbeiten eines flächigen, kristallinen Substrats, um das Substrat in mehrere Teile zu trennen, mit der

der Laserstrahl (2a, 2f) eines Lasers (3) zum Bearbeiten des Substrats (1) auf letzteres richtbar ist,

*gekennzeichnet durch*

5 eine im Strahlengang des Lasers (3) positionierte optische Anordnung (6), mit der aus dem auf letztere eingestrahnten Laserstrahl (2a) strahl-  
ausgangsseitig der optischen Anordnung (6) eine sowohl längs der  
Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau eine erste Richtung (y)  
senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnte, jedoch nicht in  
eine zweite Richtung (x), die sowohl senkrecht zur ersten Richtung (y)  
10 als auch zur Strahlrichtung (z) ist, ausgedehnte Laserstrahlbrennfläche (2f) formbar ist,

wobei das Substrat (1) relativ zur Laserstrahlbrennfläche (2f) so  
positionierbar ist oder positioniert ist, dass die Laserstrahlbrennfläche  
(2f) im Inneren des Substrats (1) entlang eines ausgedehnten Flächen-  
abschnitts (2c) des Substratmaterials eine induzierte Absorption er-  
zeugt, wodurch entlang dieses ausgedehnten Flächenabschnitts (2c)  
15 induzierte Rissbildungen im Substratmaterial bewirkt werden.

13. Vorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

20 die optische Anordnung (6) zum Ausformen der sowohl längs der  
Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau die erste Richtung (y)  
senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnten, jedoch nicht in  
die zweite Richtung (x) ausgedehnten Laserstrahlbrennfläche (2f)

25 ein optisches Element (9), bevorzugt ein Kegelprisma oder Axicon, mit  
einer nicht-sphärischen Freifläche, die zum Ausbilden der Laserstrahl-  
brennfläche (2f) mit definierter Länge  $l$ , also definierter Ausdehnung in  
Stahlrichtung (z) gesehen, ausgeformt ist, sowie

strahlausgangsseitig dieses optischen Elements (9) mit der nicht-  
sphärischen Freifläche sowie beabstandet  $z_1$  davon eine die Ausdeh-

nung des Laserstrahls (2a) in die zweite Richtung (x) beschneidende, also mit Vorzugsrichtung in die erste Richtung (y) ausgerichtete Blende (8), bevorzugt eine in die erste Richtung (y) ausgerichtete Schlitzblende (8),

5 umfasst.

14. Vorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

10 zwischen dem optischen Element (9) mit der nicht-sphärischen Freifläche und der Blende (8) ein den Laserstrahl (2a) kollimierendes optisches Element (12), insbesondere eine plankonvexe Kollimationslinse (12), so positioniert und ausgerichtet ist, dass die vom optischen Element (9) mit der nicht-sphärischen Freifläche ausgehende Laserstrahlung parallel auf die Blende (8) geworfen wird.

15. Vorrichtung nach einem der drei vorhergehenden Ansprüche,

15 *dadurch gekennzeichnet, dass*

die optische Anordnung (6) zum Ausformen der sowohl längs der Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau die erste Richtung (y) senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnten, jedoch nicht in die zweite Richtung (x) ausgedehnten Laserstrahlbrennfläche (2f)

20 ein optisches Element (9), bevorzugt ein Kegelprisma oder Axicon, mit einer nicht-sphärischen Freifläche, die zum Ausbilden der Laserstrahlbrennfläche (2f) mit definierter Länge  $l$ , also definierter Ausdehnung in Strahlrichtung (z) gesehen, ausgeformt ist, sowie

25 strahlausgangsseitig dieses optischen Elements (9) mit der nicht-sphärischen Freifläche sowie beabstandet  $z_2$  davon eine den Laserstrahl (2a) in die erste Richtung (y), nicht jedoch in die zweite Richtung (x) fokussierendes optisches Element (7), bevorzugt eine parallel zur zweiten Richtung (x) ausgerichtete Zylinderlinse (7),

umfasst.

16. Vorrichtung nach einem der drei vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

5

die optische Anordnung (6) strahlausgangsseitig der Blende (8) oder des den Laserstrahl (2a) in die erste Richtung (y), nicht jedoch in die zweite Richtung (x) fokussierenden optischen Elements (7) ein den Laserstrahl (2a) zumindest in die erste Richtung (y) fokussierendes optisches Element (11), bevorzugt eine den Laserstrahl (2a) in die erste (y) und in die zweite (x) Richtung fokussierende Kollimationslinse, besonders bevorzugt eine plankonvexe Kollimationslinse (11), umfasst.

10

17. Vorrichtung nach einem der fünf vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

15

die optische Anordnung (6) zum Ausformen der sowohl längs der Strahlrichtung (z) gesehen als auch in genau die erste Richtung (y) senkrecht zur Strahlrichtung (z) gesehen ausgedehnten, jedoch nicht in die zweite Richtung (x) ausgedehnten Laserstrahlbrennfläche (2f)

20

ein optisches Element (13), bevorzugt einen Doppelkeil (13), aufweist, mit dem Strahlenbündel (s1, s2) aus den beiden sich in der ersten Richtung (y) gesehen in Bezug auf die optische Achse (6z) der optischen Anordnung (6) gegenüberliegenden Halbräumen (y1, y2) jeweils parallel und zur optischen Achse (6z) hin ablenkbar sind, sowie

25

strahlausgangsseitig dieses optischen Elements (13) ein den Laserstrahl (2a) zumindest in die erste Richtung (y) fokussierendes optisches Element, bevorzugt eine den Laserstrahl (2a) in die erste (y) und in die zweite (x) Richtung fokussierende Kollimationslinse, besonders bevorzugt eine plankonvexe Kollimationslinse (11),

umfasst.

18. Verwendung eines Verfahrens oder einer Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche zum

5

- Trennen eines Halbleitersubstrats, insbesondere eines 4-6 oder 3-5-Halbleitersubstrats, bevorzugt eines GaAs-Substrats, oder eines elementaren Halbleitersubstrats, bevorzugt eines Si-Substrats,
- Trennen eines Isolatorsubstrats, insbesondere eines Oxids, bevorzugt von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Saphir) oder von  $\text{SiO}_2$  (Quarz), oder eines Fluorids, bevorzugt von  $\text{CaF}_2$  oder von  $\text{MgF}_2$ , oder eines Chlorids, bevorzugt von  $\text{NaCl}$ , oder eines Nitrids, bevorzugt von  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oder von  $\text{BN}$ ,

10

oder

- Trennen eines Substrats enthaltend oder bestehend aus mindestens ein(em) kohlenstoffbasierten/s Material mit kristalliner oder quasi-kristalliner Grundordnung, insbesondere enthaltend oder bestehend aus Kohlenstoffnanoröhren.

FIG 1

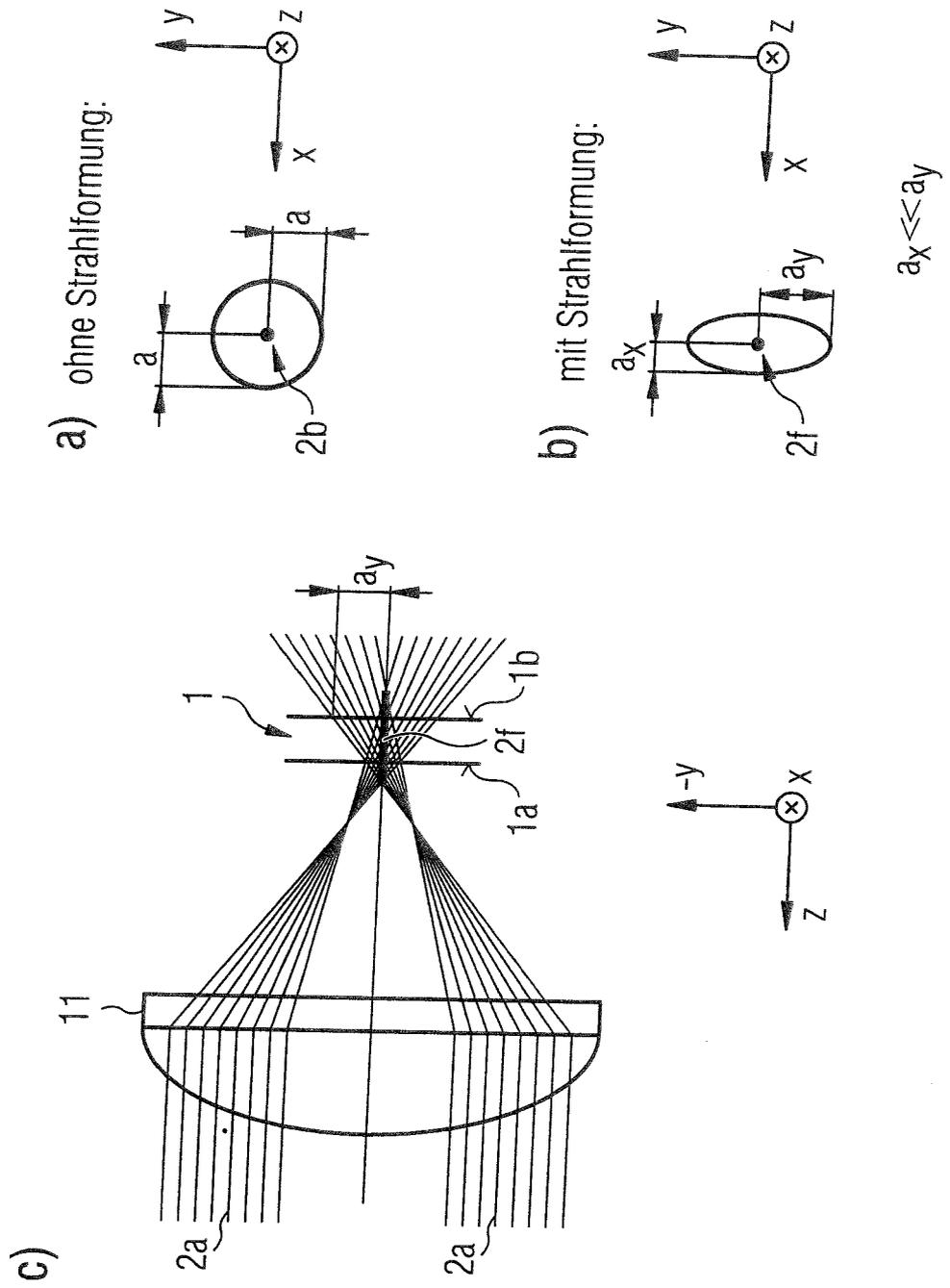
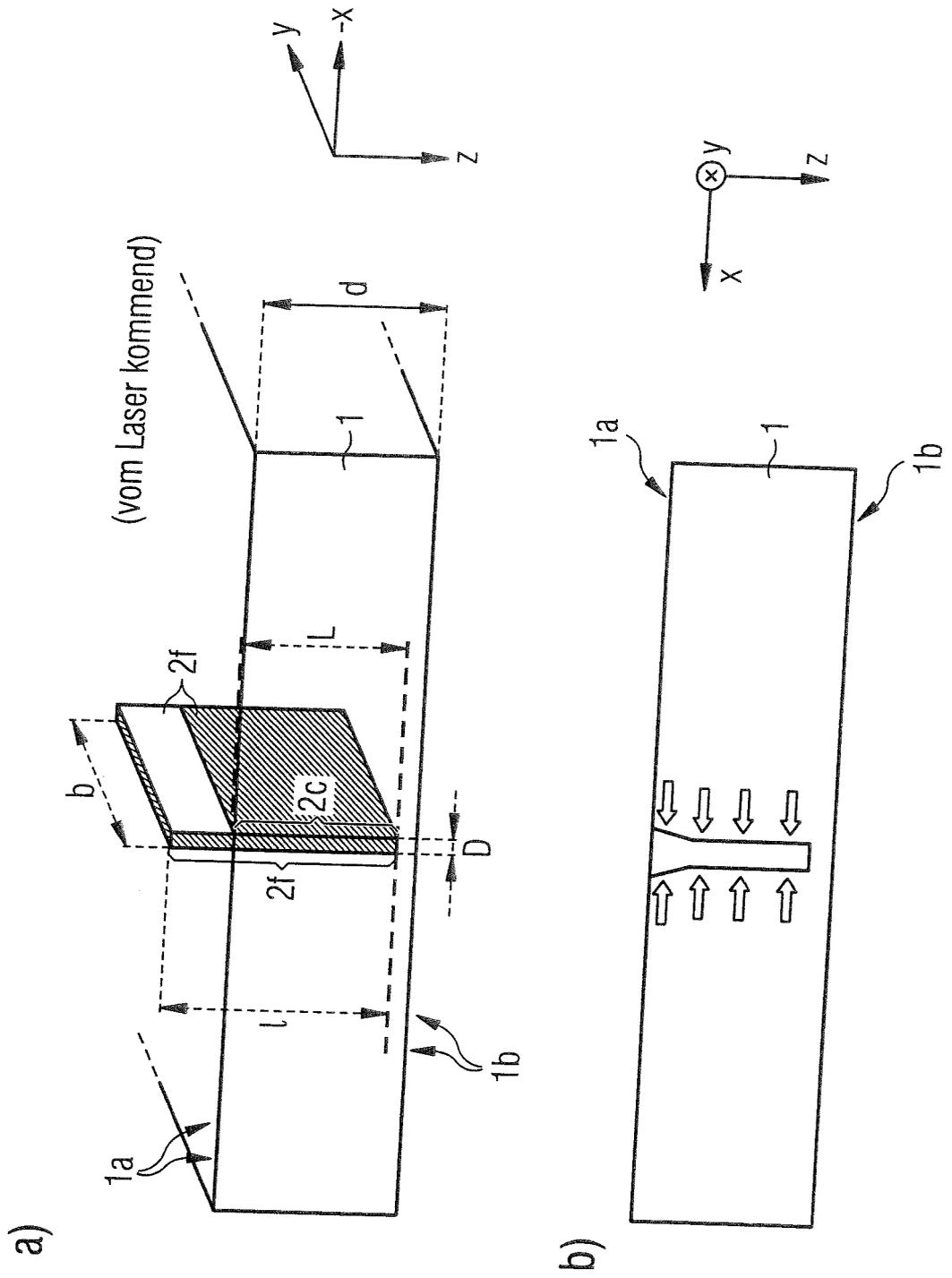


FIG 2



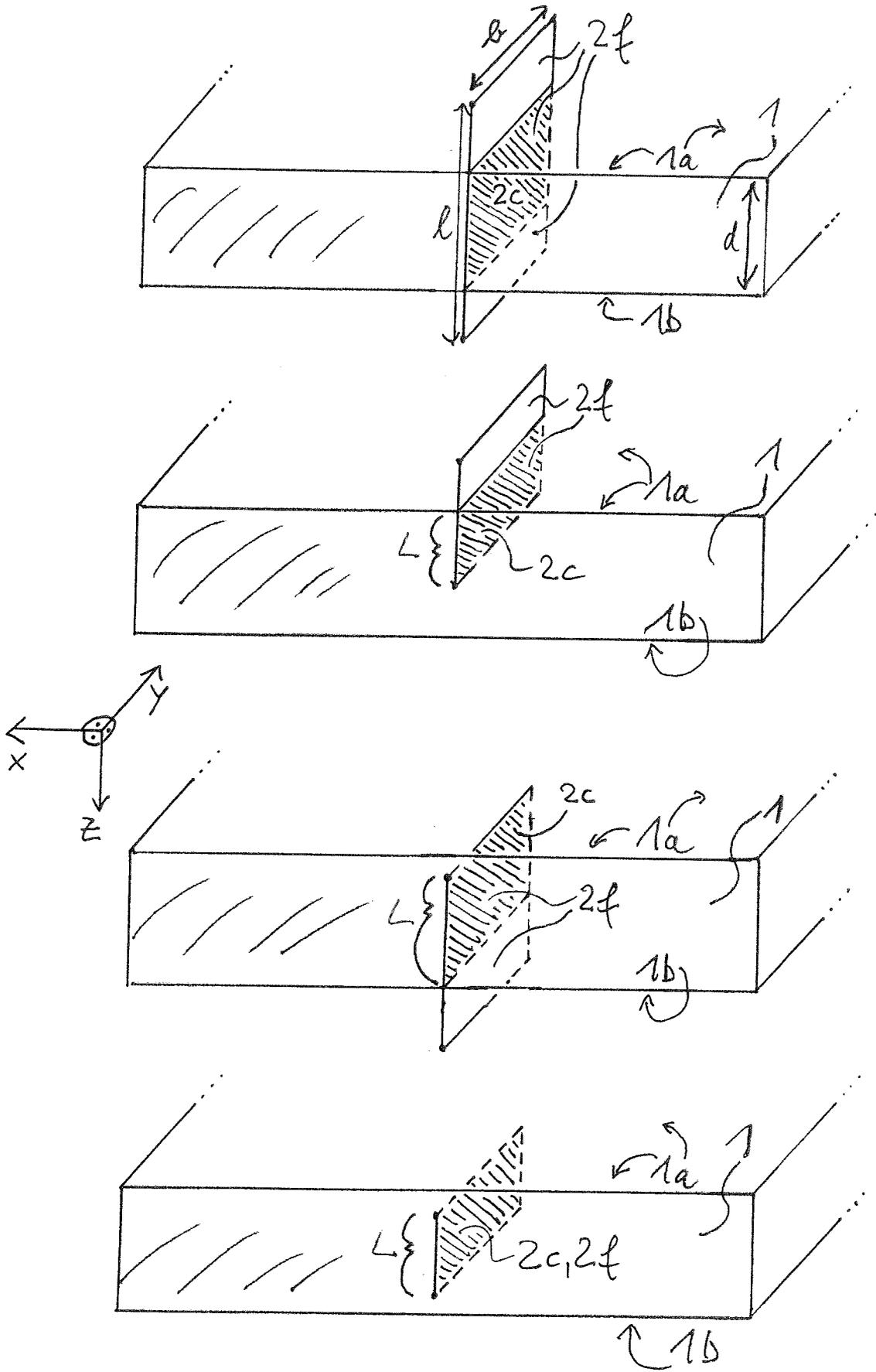


Fig. 3

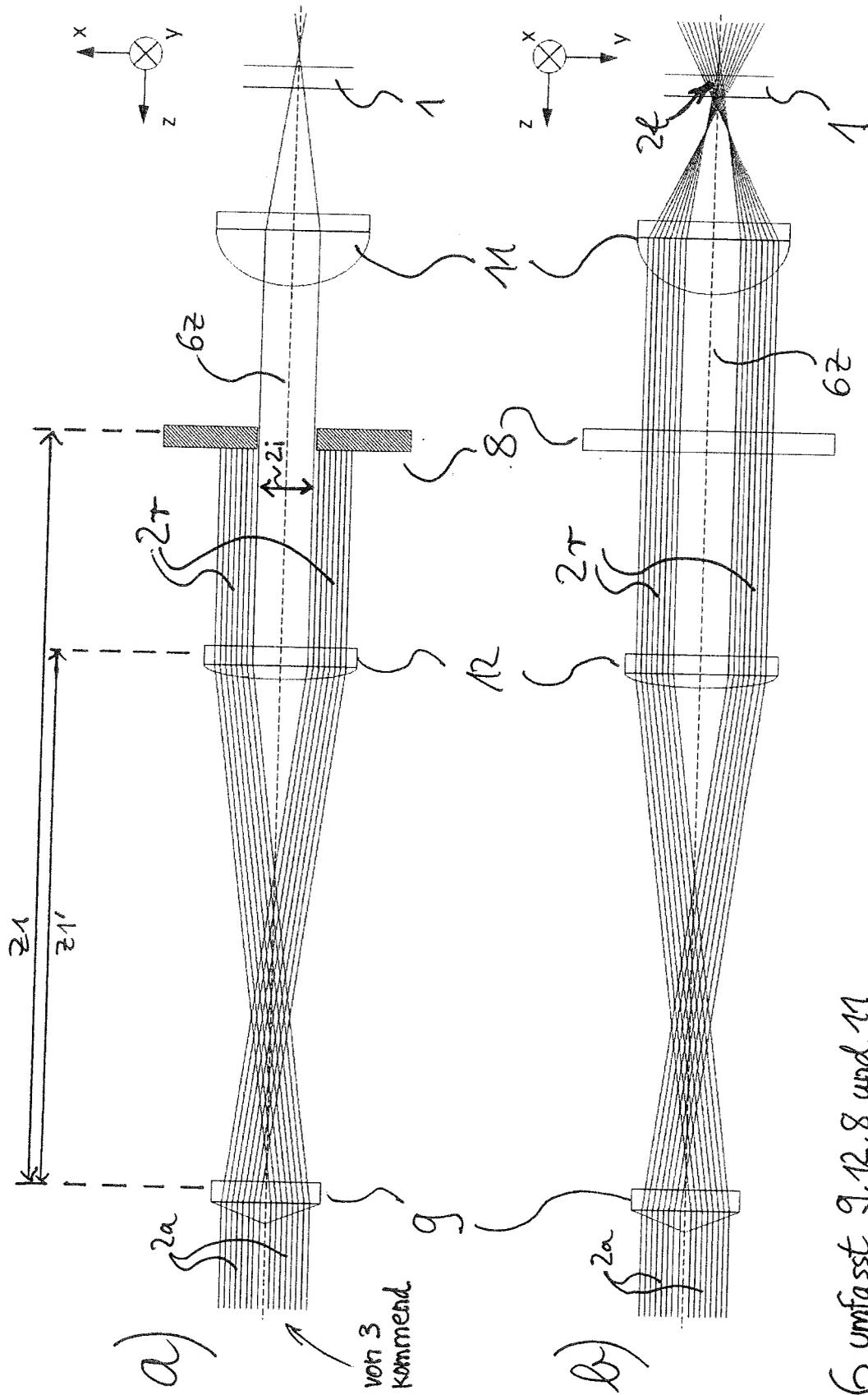


Fig. 4

6 umfasst 9, 12, 8 und 11

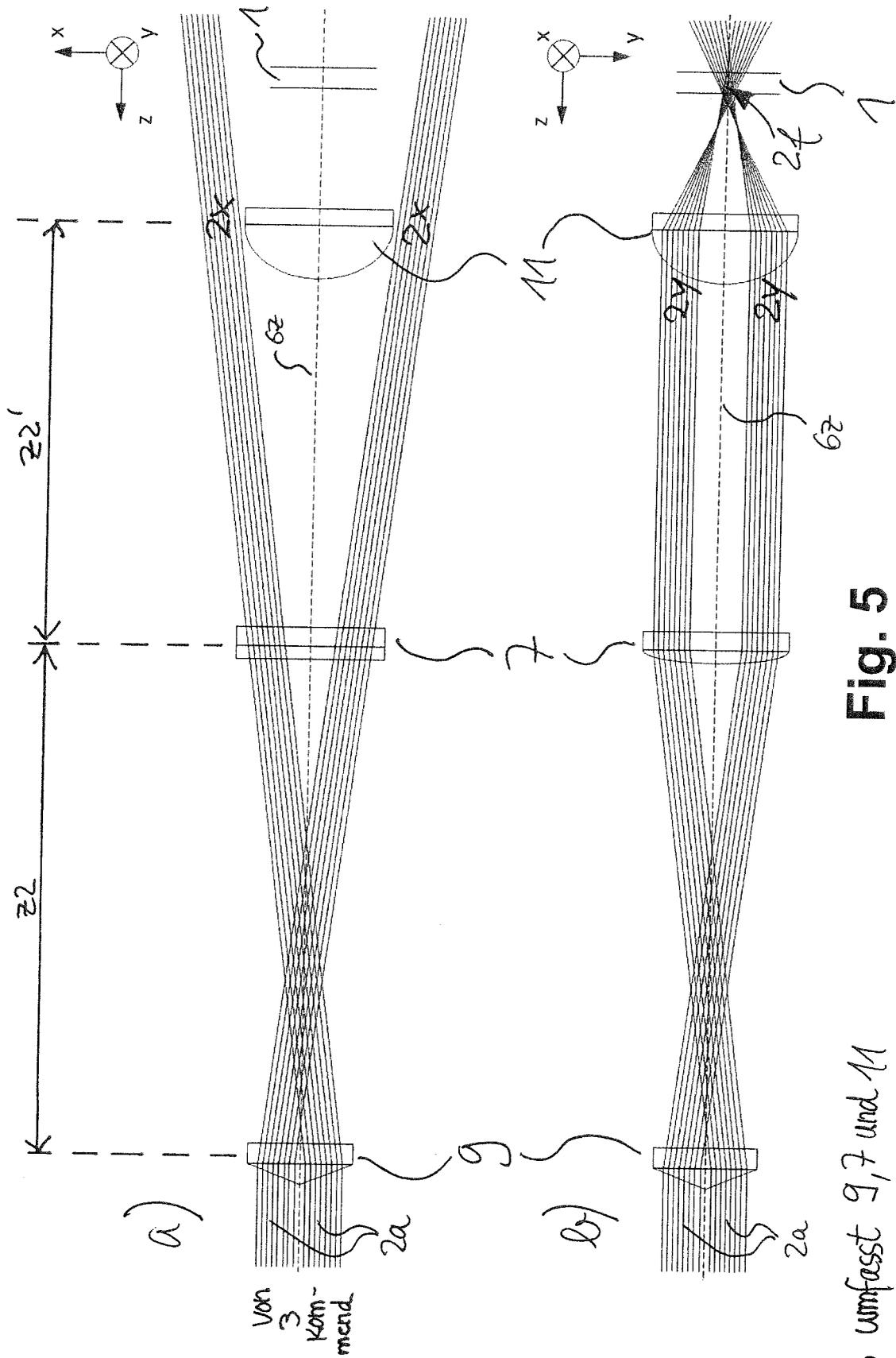


Fig. 5

6 umfasst 9, 7 und 11

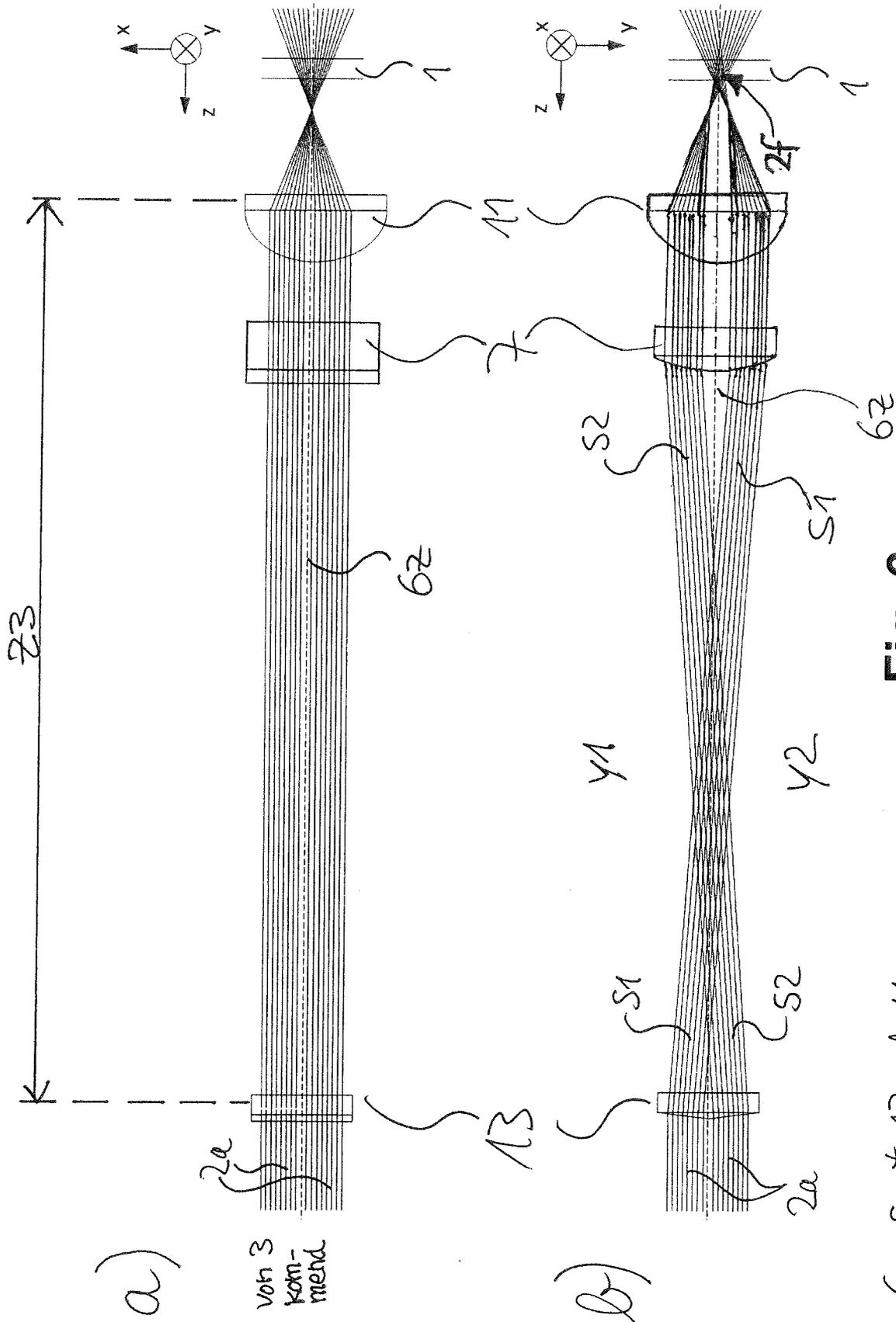


Fig. 6

6 umfasst 13 und 11

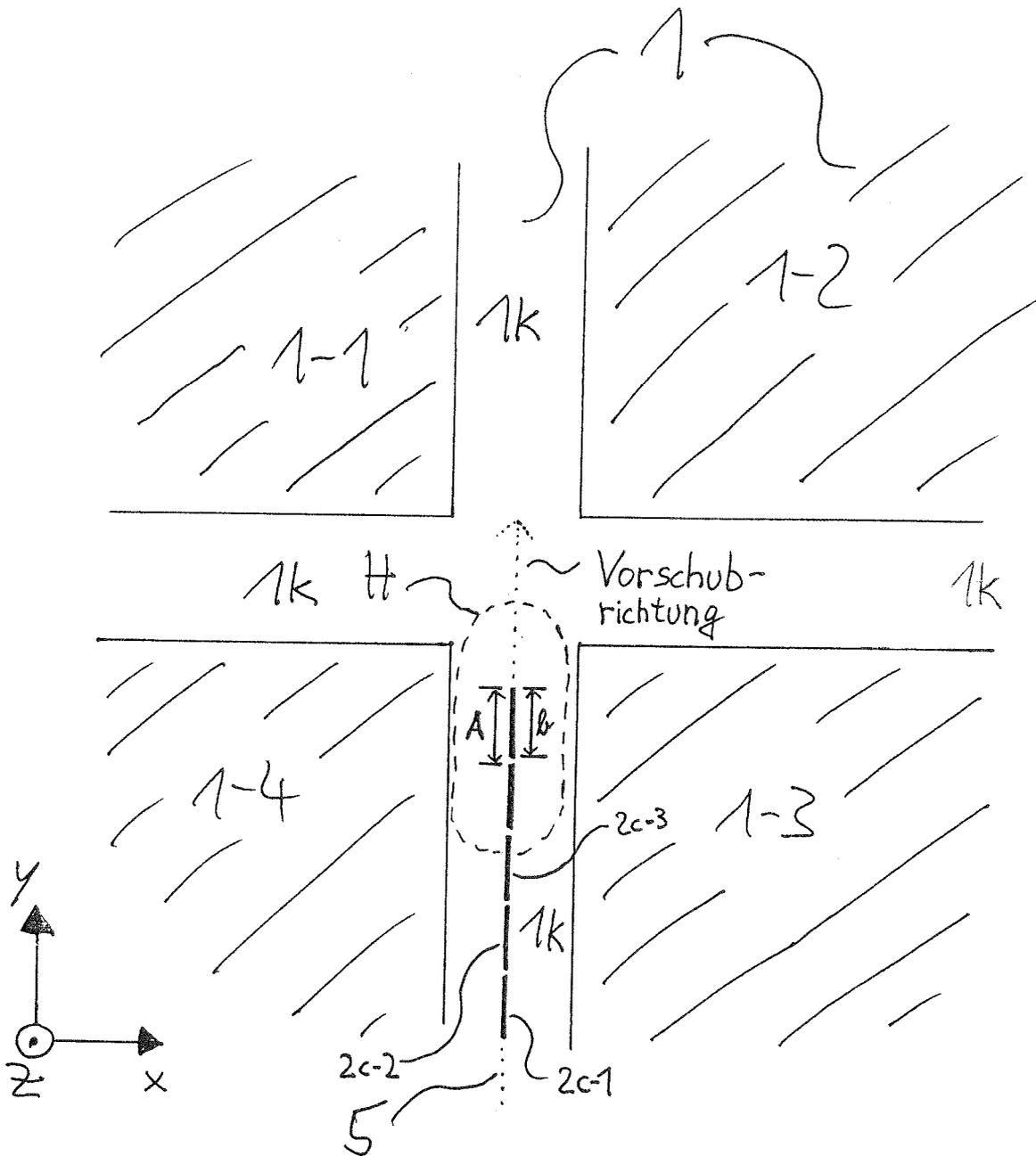


Fig. 7

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/EP2015/065476

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 INV. B23K26/00 B23K26/06 B23K26/073 B23K26/0622  
 ADD. B23K101/40

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**  
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
 EPO-Internal, WPI Data

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2013/327389 A1 (BAIRD BRIAN W [US] ET AL) 12 December 2013 (2013-12-12) paragraphs [0100], [0117] - [0126], [0202], [0124] - [0144], [0224] - [0226]; claims 120-143; figures 1,8 -----	1,2, 6-12,18
X	US 6 472 295 B1 (MORRIS JAMES H [US] ET AL) 29 October 2002 (2002-10-29) columns 2,3,6,7; figures 1-6 -----	1-5,7,8, 10-18
X	US 2013/119031 A1 (MATSUDA RYOZO [JP] ET AL) 16 May 2013 (2013-05-16) paragraphs [0018] - [0022], [0031]; claims 1-3; figures 1-9 -----	1,12,18
X	US 2002/050489 A1 (IKEGAMI HIROSHI [JP] ET AL) 2 May 2002 (2002-05-02) paragraphs [0072] - [0100], [0183]; claims 1-20; figures 1-20 -----	1,12,18

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  23 October 2015	Date of mailing of the international search report  02/11/2015
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Hernanz, Sonsoles
--	---

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/065476

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2013327389	A1	12-12-2013	EP 2613906 A1 17-07-2013
			EP 2614525 A2 17-07-2013
			US 2013244449 A1 19-09-2013
			US 2013327389 A1 12-12-2013
			WO 2012032063 A1 15-03-2012
			WO 2012032064 A2 15-03-2012
			-----
US 6472295	B1	29-10-2002	AU 7073600 A 26-03-2001
			EP 1210729 A1 05-06-2002
			US 6472295 B1 29-10-2002
			US 2003034093 A1 20-02-2003
			WO 0117001 A1 08-03-2001
-----			
US 2013119031	A1	16-05-2013	CN 102986001 A 20-03-2013
			JP 4948629 B2 06-06-2012
			JP 2012024783 A 09-02-2012
			KR 20130036317 A 11-04-2013
			TW 201204498 A 01-02-2012
			US 2013119031 A1 16-05-2013
			WO 2012011202 A1 26-01-2012
-----			
US 2002050489	A1	02-05-2002	NONE
-----			

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/065476

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. B23K26/00 B23K26/06 B23K26/073 B23K26/0622  
 ADD. B23K101/40

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 B23K

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)  
 EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2013/327389 A1 (BAIRD BRIAN W [US] ET AL) 12. Dezember 2013 (2013-12-12) Absätze [0100], [0117] - [0126], [0202], [0124] - [0144], [0224] - [0226]; Ansprüche 120-143; Abbildungen 1,8 -----	1,2, 6-12,18
X	US 6 472 295 B1 (MORRIS JAMES H [US] ET AL) 29. Oktober 2002 (2002-10-29) Spalten 2,3,6,7; Abbildungen 1-6 -----	1-5,7,8, 10-18
X	US 2013/119031 A1 (MATSUDA RYOZO [JP] ET AL) 16. Mai 2013 (2013-05-16) Absätze [0018] - [0022], [0031]; Ansprüche 1-3; Abbildungen 1-9 -----	1,12,18
X	US 2002/050489 A1 (IKEGAMI HIROSHI [JP] ET AL) 2. Mai 2002 (2002-05-02) Absätze [0072] - [0100], [0183]; Ansprüche 1-20; Abbildungen 1-20 -----	1,12,18

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen  Siehe Anhang Patentfamilie

- \* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
23. Oktober 2015	02/11/2015

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter  Hernanz, Sonsoles
--	--

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/065476

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2013327389 A1	12-12-2013	EP 2613906 A1	17-07-2013
		EP 2614525 A2	17-07-2013
		US 2013244449 A1	19-09-2013
		US 2013327389 A1	12-12-2013
		WO 2012032063 A1	15-03-2012
		WO 2012032064 A2	15-03-2012
US 6472295 B1	29-10-2002	AU 7073600 A	26-03-2001
		EP 1210729 A1	05-06-2002
		US 6472295 B1	29-10-2002
		US 2003034093 A1	20-02-2003
		WO 0117001 A1	08-03-2001
US 2013119031 A1	16-05-2013	CN 102986001 A	20-03-2013
		JP 4948629 B2	06-06-2012
		JP 2012024783 A	09-02-2012
		KR 20130036317 A	11-04-2013
		TW 201204498 A	01-02-2012
		US 2013119031 A1	16-05-2013
		WO 2012011202 A1	26-01-2012
US 2002050489 A1	02-05-2002	KEINE	