



(10) **DE 10 2008 000 306 B4** 2010.08.19

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 000 306.9**

(22) Anmeldetag: **15.02.2008**

(43) Offenlegungstag: **27.08.2009**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **19.08.2010**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **B23K 26/38** (2006.01)

Innerhalb von drei 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).

(73) Patentinhaber:  
**3D-Micromac AG, 09126 Chemnitz, DE**

(74) Vertreter:  
**Bauer, S., Dipl.-Ing. Faching. f. Schutzrechtsw.,  
Pat.-Anw., 09661 Hainichen**

(72) Erfinder:  
**Höche, Thomas, Dr.rer.nat.habil., 06120 Halle, DE;  
Petsch, Tino, Dipl.-Ing., 09127 Chemnitz, DE;  
Keiper, Bernd, Dr.-Ing., 09217 Burgstädt, DE;  
Lasch, Markus, Dipl.-Ing., 09380 Thalheim, DE**

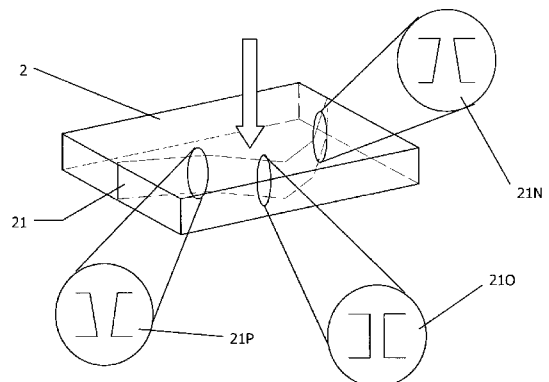
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 199 05 571 C1**  
**DE 10 2005 047328 B3**  
**EP 10 39 789 B1**  
**EP 16 98 426 A1**

**KNOWLES, M.R.H.: Micro-ablation with high power  
pulsed cooper vapor lasers. Optic Express,  
2000, Vol.7, Nr.2, S.50-55**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Laserschneiden**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Laserschneiden eines in einer definierten Ausgangsposition angeordneten, zu bearbeitenden Werkstücks (2), indem ein in eine Rotation und eine Taumelbewegung versetzter Laserstrahl an einer vorbestimmten Position in das Werkstück (2) eindringt und von dieser Position ausgehend das Werkstück (2) mittels einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück (2) und dem Laserstrahl mit einem einer vorgegebenen Bahnkurve folgenden Schnittspalt versehen wird, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Bahnpunkt ein Schnittspaltwinkel vorgesehen ist, der durch Vorgabe des Auftreffwinkels und des Strahlrotationsdurchmessers des Laserstrahls eingestellt wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Schneiden von Materialien mit Dicken von wenigen 100 µm bis ca. 1 bis 2 mm mittels fokussierter Laserstrahlung. Vorzugsweise werden die Laserstrahlen in eine Rotation in sich selbst und eine Taumelbewegung versetzt (Wendelbohren), wodurch sowohl eine positive als auch eine negative Aufweitung des Schnittspaltes möglich ist.

**[0002]** Es ist bekannt, Mikrolöcher mittels fokussierter Laserstrahlung zu bohren. Ausgehend vom reinen Fokusabtrag, bei dem ein entsprechend fokussierter Laserstrahl mit geeignetem Strahlprofil auf eine Materialoberfläche gerichtet wird und bei Überschreitung einer vom Material abhängigen Ablations-schwellfluenz das Material abgetragen wird, wurde das Laserbohren im Hinblick auf Verbesserungen der Zirkularität, der Beschaffenheit der Oberfläche der Bohrungsinnenwände und der Konizität fortentwickelt. Ein wesentlicher Fortschritt ist die Technologie des Wendelbohrens, bei dem ein auf ein unbewegtes Werkstück gerichteter, in sich rotierender Laserstrahl eine definierte Taumelbewegung ausführt. Dadurch werden zylindrische oder positiv- oder negativ-konische Bohrungen sehr guter Zirkularität und hoher Oberflächengüte der Bohrungsinnenwände erreicht. Die Lochdurchmesser betragen minimal wenige 10 µm. Es werden vornehmlich relativ langpulsige Nanosekundenlaser eingesetzt, doch auch Ultrakurzpuls-laser mit hinreichend hoher Pulsenergie können angewendet werden. Das Verfahren und zur Durchführung geeignete Vorrichtungen sind aus den Erfindungsbeschreibungen DE 197 45 280 A1, DE 199 05 571 C1 und DE 10 2005 047 328 B3 bekannt.

**[0003]** So beschreibt die DE 197 45 280 A1 ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Fein- und Mikrobearbeitung von Werkstücken mittels Laserstrahlen, wobei der Laserstrahl vor dem Auftreffen auf das Werkstück durch drei Module derart geführt wird, dass in dem ersten Modul der Laserstrahl um seine Strahlachse gedreht wird, mittels des zweiten Moduls der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Werkstück variiert wird und mittels des dritten Moduls die Auftreffneigung des Laserstrahls relativ zur Oberfläche des Werkstücks variiert wird. Die Vorteile bestehen darin, dass durch die Drehung des Laserstrahls um seine Drehachse eine ungleichmäßige Intensitätsverteilung und/oder eine unrunde Fokussierung kompensiert werden kann und somit eine gleichmäßige Schnittfuge bei der Bearbeitung des Werkstücks entsteht, dass die Variation des Auftreffpunktes des Laserstrahls eine weitestgehend freie Wahl der Formgebung bei der Bearbeitung erlaubt, und dass die Variation der Auftreffneigung des Laserstrahls die Einstellung einer gewünschten Konizität ermöglicht.

**[0004]** Die DE 199 05 571 C1 betrifft ein Verfahren

zur Erzeugung von Löchern in einem Werkstück mittels eines Laserstrahls. Dabei führt der Laserstrahl eine Taumelbewegung relativ zum Werkstück aus und durchläuft dabei eine Kegelmantelfläche. Durch die Taumelbewegung kann das Längsprofil eines Bohrloches exakt definiert werden. Der Laserstrahl wird zusätzlich synchron mit der Taumelbewegung um die eigene Achse gedreht. Daher ist zu jedem Zeitpunkt die gleiche Laserstrahlstelle in azimuthaler Richtung im Eingriff mit dem Werkstück. Dadurch wird ein unrunder Laserstrahlquerschnitt egalisiert und es entstehen extrem runde Lochquerschnitte. Die Lochgeometrie kann in Längsrichtung bei Verwendung von polarisiertem Laserlicht durch Wahl von Polarisationsrichtung und/oder Polarisationsart eingestellt werden. Mittels eines linear polarisierten Laserstrahls kann eine ovale Lochgeometrie an der Seite des Lichtaustritts erzeugt werden. Mittels zirkular polarisierten Laserlichts lassen sich besonders runde Lochquerschnitte realisieren. Auch kann das Bohrloch konisch ausgebildet werden, wobei der Bohrl Lochdurchmesser in Strahlaustrittsrichtung zunehmen kann. Um eine sehr enge Bündelung des Laserstrahls im Fokusbereich zu erzielen, kann es zweckmäßig sein, den Querschnitt des Laserstrahls vor dessen Durchgang durch die Fokussierlinse aufzuweiten. Hierfür kann eine teleskopartige Linsen-anordnung verwendet werden, die im Strahlengang zwischen Laser und Linse praktisch an beliebiger Stelle platziert werden kann. Der Fokusbereich des Laserstrahls kann am Locheintritt an der Werkstückoberfläche liegen. Das bekannte Verfahren hat den Vorteil, dass durch Einstellung der Strahlgeometrie und/oder der Strahlparameter des Laserstrahls sehr flexible Lochgeometrien mit hoher Präzision herstellbar sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Verfahren auch auf sehr kleine Lochdurchmesser im Bereich von 100 µm und darunter anwendbar ist. Darüber hinaus ist das Bohrverfahren im Vergleich zu bekannten Bohrverfahren erheblich schneller, wodurch sich beim Einsatz in der industriellen Produktion merkliche Kostenvorteile realisieren lassen.

**[0005]** Aus der DE 10 2005 047 328 B3 ist eine Vorrichtung zum Bohren und für den Materialabtrag mittels Laserstrahl bekannt, die einen drehenden Bildrotator, einen in Strahlrichtung gesehen vor dem Bildrotator angeordneten Strahlmanipulator für die Winkel- und Lageeinstellung des Strahls relativ zur Rotationsachse des Bildrotators und eine Fokussiereinrichtung ausgangsseitig des Bildrotators aufweist. Der bekannten Vorrichtung liegt die Aufgabe zugrunde, die Auswirkungen der fertigungsbedingten Geometriefehler von Bildrotatoren als Teil der Vorrichtung zum Bohren und für den Materialabtrag mittels Laserstrahl auszugleichen. Bildrotatoren können Strahlung transmittierende Prismen wie das Dove-Prisma oder das Abbe-König-Prisma aber auch reflektierende Systeme wie eine K-Spiegelanordnung sein. Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, dass zwischen Bildro-

tator und Fokussiereinrichtung eine Ausgleichsvorrichtung angeordnet ist, die in gleicher Drehrichtung und mit gleicher Drehfrequenz mit dem Bildrotator dreht, wobei die Ausgleichsvorrichtung eine Parallelversatzeinheit und Winkeländerungseinheit aufweist, und dass die Ausgleichsvorrichtung in ihrer relativen Drehposition zu dem Bildrotator in einer Grundeinstellung einstellbar ist. Mit der bekannten Anordnung kann in der Bearbeitungsebene eine gleichförmige Rotationsbewegung (Strahlform) und damit ein gleichmäßiger Abtrag erreicht werden, wodurch eine runde Bohrung gebildet werden kann.

**[0006]** Es ist ferner bekannt, mit einem Laserstrahl Material zu schneiden, indem in das Material eine Bohrung eingebracht und dann zwischen dem Laserstrahl und dem Material eine Relativbewegung entlang einer vorgegebenen Bahnkurve ausgeführt wird. So beschreibt M. R. H. Knowles in OPTIC EXPRESS, Vol. 7, No. 2 vom 17.07.2000 auf Seite 53 innerhalb des Artikels „Micro-ablation with high power pulsed copper vapour lasers“ das Mikro-Schneiden mit Kupferdampf Lasern. Hierbei wird die hohe Strahlgüte ausgenutzt, um sehr präzise Schnitte zu erreichen. Insbesondere kann die Abweichung von der Rechtwinkligkeit der Schnittkanten weniger als  $1^\circ$  betragen. Allerdings kann gerade eine größere Abweichung von der Rechtwinkligkeit des Schnittspaltwinkels erforderlich sein, so dass das bekannte Verfahren dann nicht zur Anwendung gelangen kann.

**[0007]** Aus der EP 1 698 426 A1 ist bekannt, mittels eines Laserstrahls Material zu schneiden und dabei den Laserstrahl durch einen im Strahlengang angeordneten, rotier- und kippbaren Zylinder sowie eine dem Zylinder vor- und eine dem Zylinder nachgeordnete Verzögerungsplatte zu führen, so dass ein bestimmter Auftreffwinkel eingestellt und derart Schnitte mit zur Längsrichtung der optischen Achse parallelen Seitenflächen erzeugt werden. Die Ablenkung des Laserstrahls aus der optischen Achse erfolgt in Abhängigkeit vom zu schneidenden Material, indem der Zylinder in einem bestimmten Winkel B aus der optischen Achse gekippt und um einen bestimmten Winkel A um die optische Achse verdreht wird, so dass nach der Umlenkung mittels Spiegels die Refraktion außerhalb der optischen Achse erfolgt, wodurch neben der Fokussierung des Laserstrahls ein bezüglich der optischen Achse von „0“ verschiedener Auftreffwinkel erreicht wird. Sowohl der Kippwinkel B als auch der Rotationswinkel A des Zylinders nehmen definierte Werte an, die hinsichtlich der Materialbearbeitung den Auftreffwinkel C bzgl. der optischen Achse bzw. den Kreiswinkel D auf der Oberfläche des Materials um die optische Achse bestimmen. Das Kippen und Rotieren des Zylinders ist jedoch keine kontinuierlich wiederholte Bewegung, so dass die bekannte Lösung insbesondere nicht auf die Rotation in sich selbst und das gleichzeitige Taumeln des Laserstrahls abzielt. Auf das mittels eines Lasers zu

schneidende Material trifft ein konvergenter Laserstrahl unter dem vorbestimmten Winkel C auf. Eine Variation des Schnittspaltwinkels ist auf diese Weise nicht möglich sondern nur eine unterschiedliche Neigung des festen Schnittspaltwinkels relativ zur Oberflächennormalen des Werkstücks. Dabei kann der Auftreffwinkel von der Schnittposition abhängen, es ist jedoch nicht möglich, dass jedem Bahnpunkt ein einzustellender Schnittspaltwinkel zugeordnet ist.

**[0008]** Daraus ergibt sich die Aufgabe der Erfindung, veränderliche Schnittspaltwinkel beim Mikroschneiden mittels Laser zu ermöglichen.

**[0009]** Die Lösung der Aufgabe erfolgt mittels eines Verfahrens gemäß Patentanspruch 1 zum Laserschneiden eines in einer definierten Ausgangsposition angeordneten, zu bearbeitenden Werkstücks, indem an einer vorbestimmten Position ein Laserstrahl in das Werkstück eindringt und von dieser Position ausgehend mittels einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück und einer Laserquelle das Werkstück mit einem Schnittspalt versehen wird, der einer vorgegebenen Bahnkurve folgt. Dabei ist jedem Bahnpunkt ein vorgegebener Schnittspaltwinkel zugeordnet. Der Schnittspaltwinkel wird durch Einstellung des Auftreffwinkels und des Strahlrotationsdurchmessers des Laserstrahls verändert. Die Fokussierung des Laserstrahls erfolgt nach der Einstellung des Strahlrotationsdurchmessers des eine Rotation und eine Taumelbewegung ausführenden Laserstrahls, beispielsweise mittels einer Fokussierlinse. Bei einer Mehrzahl von Schnittspalten können diese identisch, in einzelnen Parametern übereinstimmend oder völlig verschieden voneinander sein. Die Bahnkurven der Schnittspalte können in sich geschlossen sein, so dass das erfindungsgemäße Verfahren zum Perforieren mit vielfältig anpassbaren Lochparametern verwendet werden kann. Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dient die Vorrichtung gemäß Patentanspruch 2, wonach ein Werkstück in einer Laser-Bearbeitungseinrichtung angeordnet ist, die eine Wendelbohreroptik mit zwei motorisch verstellbaren Kippspiegeln und eine Werkstückpositionierungsvorrichtung umfasst und an eine die Kippspiegeleinrichtungen sowie die Werkstückposition steuernde Steuereinrichtung angeschlossen ist. Die Steuereinrichtung kann frei programmierbar ausgebildet sein. Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann um eine Beobachtungsstation ergänzt sein.

**[0010]** Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht, Auftreffwinkel und Durchmesser der auf das Werkstück auftreffenden Laserstrahlung während der zweidimensionalen Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl zu verändern, wodurch der Schnittspaltwinkel für jeden Bahnpunkt eingestellt und derart auch die dritte Dimension einbezogen wird. Dies erfolgt vorzugsweise durch motorische Einstellung zweier Kippspiegel einer Wendel-

bohroptik. Das Bearbeitungsprogramm, das sequentielle oder unter Einbeziehung einer Istwerterfassung anhand vorgegebener Funktionszusammenhänge numerisch ermittelte Sollwerte vorgibt, zeichnet sich mithin durch jeweils einen Wert zweier Ebenenkoordinaten zur Bestimmung der Position des Werkstücks bezüglich des Strahlzieles sowie zweier Winkelwerte für die Einstellung der Kippspiegel aus. Selbstverständlich kann die Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl in Abhängigkeit von für die Bearbeitungsaufgabe bedeutsamen Material- und Strahlparametern sowohl fest als auch durch das Bearbeitungsprogramm vorgegeben und/oder gegebenenfalls regelbar sein. Mittels der Beobachtungsstation kann die Einstellung der Anfangsposition und/oder eine Navigation von Hand vorteilhaft unterstützt werden.

**[0011]** Nachfolgend wird ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung anhand der Zeichnung näher erläutert. Darüber hinaus werden mehrere konkrete Anwendungsfälle der Erfindung vorgestellt. Die Zeichnung zeigt in

**[0012]** Fig. 1 die Prinzipdarstellung einer Bearbeitungsstation,

**[0013]** Fig. 2 einen Schnittpalt mit im Verlauf verschiedenen Schnittpaltwinkeln,

**[0014]** Fig. 3 eine Refraktionslinse für Röntgenstrahlen, in Draufsicht a) und Seitenansicht b) und

**[0015]** Fig. 4 ein Extraktions- und Strahlformungsgitter für Ionenstrahlquellen.

**[0016]** Ausgehend von einem geeigneten, vorzugsweise einem ns- oder ps-Laser mit hoher Pulsenergie wird gemäß Fig. 1 ein Laserstrahl einer Wendeloptik **4** zugeleitet. Die Wendeloptik **4** des bevorzugten Ausführungsbeispiels ist an sich bekannt und basiert vorzugsweise im Wesentlichen auf der Lösung nach der DE 10 2005 047 328 B3. Darin passiert der Laserstrahl einen Strahlmanipulator, durch den er hinsichtlich seines Auftreffwinkels und seines Abstandes von der Rotationsachse eines Bildrotators ausgerichtet wird. Der Bildrotator verfügt in bekannter Weise über Mittel, den Laserstrahl in Rotation um seine Strahlachse und in eine Taumelbewegung zu versetzen. Zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen und damit zur Verbesserung der Strahlqualität kann dem Bildrotator eine Symmetrievorrichtung beigeordnet sein. Anstelle der Wendeloptik **4** kann selbstverständlich jede andere Vorrichtung Verwendung finden, die einen Eingangslaserstrahl in Rotation und eine Taumelbewegung um seine Strahlachse versetzt, so dass der Ausgangsstrahl zum Wendelbohren geeignet ist. Die Wendeloptik **4** umfasst zwei Kippspiegel **6**, mit denen zum einen der Auftreffwinkel und zum zweiten der Strahlrotationsdurchmesser

des rotierenden und taumelnden Laserstrahls am Auftreffpunkt, d. h. am Punkt, an dem die Bearbeitung des Werkstücks **2** stattfindet, verändert werden. Das Werkstück **2** ist auf einem dreidimensional verfahrenbaren Positioniertisch **3** angeordnet. Der Positioniertisch **3** und die Stelleinrichtungen der Kippspiegel **6**, die vorteilhaft als Schritt- oder Servoantriebe ausgebildet sind, sind an eine CN-Steuerung **5** angeschlossen, die für jeden Zeitpunkt des Bearbeitungsprozesses die Geschwindigkeit und die Koordinaten der Verfahrbewegung des Positioniertisches **3** sowie die Winkelstellung der Kippspiegel **6** vorgibt. Eine Bildaufnahmeeinrichtung **7** dient vorteilhaft der visuellen Beobachtung beim Einrichten der Anfangsposition. Dazu wird das Werkstück **2** mittels des Positioniertisches **3** in eine gestrichelt dargestellte Beobachtungsposition gebracht.

**[0017]** Der gemäß Fig. 2 in ein Werkstück **2** eingebrachte Schnittpalt **21**, dessen Verlauf lediglich schematisch angedeutet ist, kann an verschiedenen Positionen verschiedene Schnittpaltwinkel **21X** aufweisen, die erfindungsgemäß während der Relativbewegung zwischen Laserstrahlungsachse und Werkstück **2** für jeden Punkt der Bahnkurve wie oben beschrieben eingestellt werden. Ein erster Schnittpaltwinkel **21P** erzeugt einen sich mit zunehmender Eindringtiefe der Laserstrahlung verjüngenden Schnittpalt, ein zweiter Schnittpaltwinkel **210** erzeugt einen parallelen Schnittpalt und ein dritter Schnittpaltwinkel **21N** erzeugt einen sich mit zunehmender Eindringtiefe aufweitenden Schnittpalt. Es hat sich gezeigt, dass Verjüngungen von 100 µm auf 50 µm oder Aufweitungen von 50 µm auf 100 µm Breite bei einer Werkstückdicke von 1 mm realistisch sind.

**[0018]** Eine vorteilhafte Anwendung der Erfindung liefert eine Refraktionslinse für Röntgenstrahlen gemäß Fig. 3, bestehend aus einem Linsenkörper **301** und zwei, um 90° zueinander angeordneten Bohrungsreihen **302** und **303**, durch die ein Röntgenstrahl **304** fokussiert wird. Für eine auf der Mikrometerskala aufgelöste Untersuchung der Eigenschaften von Materie mit Röntgenstrahlen ist eine Fokussierung derselben erforderlich. Allerdings können nicht – wie beispielsweise für sichtbares Licht – Linsen im herkömmlichen Sinne eingesetzt werden, da für alle Materialien der Realteil des Brechungsindex' für Röntgenstrahlung geringfügig kleiner als 1 ist ( $1 - \delta$  mit  $\delta \sim -10^{-8}$  bis  $-10^{-6}$ ). Zwar gelingt es durch diverse Ansätze wie Röntgenspiegel, Zonenplatten oder Kapillaren (alle diese Verfahren basieren entweder auf der Totalreflexion oder Beugungseffekten), Röntgenlicht zu fokussieren. Es werden jedoch seit einiger Zeit auch so genannte „compound X-ray lenses“ untersucht, die auf der Brechung von Röntgenstrahlen beruhen. Dabei nutzt man aus, dass eine einzelne, zwar stark konkave, jedoch nur schwach bündelnde Röntgenlinse dadurch entsteht, dass man zwei zylindrische

drische Löcher nebeneinander in ein Material möglichst niedriger mittlerer Ordnungszahl einbringt. Die fokussierende Wirkung einer solchen einzelnen Konkav-Linse kann verstärkt werden, indem eine Vielzahl identischer Löcher in einer Reihe angeordnet werden. Jedoch bewirkt eine solche Anordnung paralleler Löcher nur eine Fokussierung in einer, senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Röntgenstrahlung stehenden Raumrichtung, es handelt sich also um eine Zylinderlinse. Durch die Kombination zweier senkrecht aufeinander stehender Reihen paralleler Löcher entsteht eine Fokussierung auf einen Punkt. Mittels der Erfindung können von der Zylinderform abweichende Trajektorien bearbeitet werden wie etwa Parabeln. Dadurch kann das Problem der sphärischen Aberration reduziert werden. Es ist ferner möglich, Korrektorelemente in die Linsenreihe einzubauen, um der Charakteristik der genutzten Röntgenquelle Rechnung zu tragen. Neben der Trajektorie kann auch die Konizität einer oder mehrerer Öffnungen variiert werden. Mit der Erfindung werden Öffnungsdurchmesser von wenigen 10 µm erzielt. Wegen der technologieinhärenten Zustellgenauigkeit von bis zu 500 nm reduzieren sich Fehler in der relativen Anordnung der Einzellinsen auf ein Minimum. Durch die höhere Packungsdichte aufgrund kleinerer Krümmungsradien werden bei gleicher Brennweite und damit geringerer Länge der Linsenkörper Absorptionseffekte reduziert. Damit können auch Materialien mit nicht ultimativ kleinen mittleren Ordnungszahlen wie z. B. Al, Diamand oder Si als Grundmaterial für Linsenkörper eingesetzt werden. Auch sind komplexe Anordnungen mehrerer Linsenreihen wie parallele, ineinander verzahnte Reihen, aufeinander zulaufende Reihen etc. problemlos realisierbar.

**[0019]** Ionenstrahlquellen (HF- oder ERC-Quellen) erzeugen in einem Plasmaraum aus Edelgasen ein Plasma, aus dem mittels Extraktions- und Führungsgittern ein Ionenstrahl ausgekoppelt wird. Aufgrund der räumlichen Nähe zum Plasma unterliegen diese Gitter einer starken Erosion und sind folglich aus Materialien befertigt, die möglichst niedrige Abtragsraten aufweisen, wie Molybdän oder Graphit. Um eine optimale Strahlformung der extrahierten Ionen zu erzielen, weisen die Gitter komplexe Lochanordnungen auf planaren oder gar gekrümmten Substraten auf. In herkömmlicher Ausbildung sind die Öffnungen zylindrische Bohrlöcher mit vorwiegend identischem Durchmesser, die gegebenenfalls unter einem Neigungswinkel eingebracht werden. Durch die Anwendung der Erfindung eröffnen sich weitere Möglichkeiten der Ausgestaltung der Lochanordnungen. So zeigt **Fig. 4** ein wabenförmiges Extraktions- und Führungsgitter **401** mit sechseckigen Öffnungen **402**. Lichte Weite und/oder Konizität jeder einzelnen Öffnung können gezielt eingestellt werden, so dass Öffnungen erzeugt werden, die deutlich kleiner sind als dies mittels abrasiven Bohrens mit einem Schneidwerkzeug möglich ist. Die Stege zwischen den Öff-

nungen sind hinreichend stark ausprägbar, um auch bei längerer Betriebsdauer ein Brechen des Gitters zu verhindern. Damit kann entweder bei gleicher Transparenz der Gitter eine längere Betriebszeit erreicht werden, oder aber es kann bei gleicher Betriebszeit die Transparenz erhöht werden. Darüber hinaus sind elliptische oder jegliche andere Formen möglich, die sich einer mathematischen Beschreibung folgend durch Relativbewegung bezüglich eines Laserstrahles erzeugen lassen. Durch die Wahl der Konizität des Schnittspalts beziehungsweise deren positionsabhängige Nachführung können relativ zur Bearbeitungsrichtung geneigte Öffnungen erzeugt werden, um das Ionenstrahlprofil gezielt zu beeinflussen.

**[0020]** Weitere Anwendungsgebiete der Erfindung, die nachfolgend ohne Bezug auf die Zeichnung erläutert werden, ergeben sich beispielsweise bei der Herstellung von elektronentransparenten Stegen von Lamellen zur Transmissionselektronenmikroskopie, aber auch von Spinddüsen oder Kühl- bzw. Formöffnungen von Turbinenschaufeln von Strahltriebwerken sowie bei der Vorbereitung von Proben zur Fehlerdiagnostik und Qualitätskontrolle in der Halbleitertechnik mittels Ionenstrahl-Böschungssätzverfahren.

**[0021]** Die Ausführung des Lamellenschnitts für die Transmissionselektronenmikroskopie unter Anwendung der Erfindung hat den Vorteil, dass der Keilwinkel sehr genau kontrolliert werden kann. Insbesondere kann er Werte kleiner als 15° bis nahezu parallel (0°) annehmen. Darüber hinaus kann entlang der Lamelle eine Veränderung des Keilwinkels vorgenommen werden, was für die Stabilisierung hilfreich sein kann. Die Lamelle könnte also in der Mitte einen nahezu parallelen, extrem dünnen Steg aufweisen, der zu den beiden Seiten hin sukzessive größere Keilwinkel annimmt.

**[0022]** Durch die Anwendung der Erfindung zur Herstellung von Spinddüsen können vorteilhaft bis zu wenige Millimeter dicke Substrate mit sehr kleinen Durchgangsstrukturen versehen werden, die eine sehr gute Oberflächenrauheit der inneren Oberflächen aufweisen. Dabei kann während des Schneidens einer Spinddüse die Konizität des Schnitts an der jeweiligen Stelle variiert werden, wodurch etwa parallele Bereiche sich an leicht konische Strukturen direkt anschließen können, was eine größere Variabilität bei der Auslegung der Spinddüsengeometrie bedeutet.

**[0023]** Strahltriebwerksturbinenschaufeln weisen ein komplexes System von Kühlöffnungen auf, durch die ein Luftpolster zwischen heißer Verbrennungsluft und Oberfläche der Turbinenschaufel erzeugt wird. Diese Öffnungen sind so ausgeführt, dass der Luftaustritt bereits parallel zur Oberfläche der Turbinenschaufel erfolgt. Sie öffnen sich also unter

einem sehr flachen Winkel zur Oberfläche. Zum Erzeugen derartiger Kühlungslöcher ist eine gleichzeitige Kontrolle von Position (Führen des Laserstrahls entlang einer definierten Trajektorie) und Konizität von Vorteil. Darüber hinaus ergibt sich beim Einsatz von Ultrakurzpulslaserstrahlung der Vorteil geringer thermischer Belastung des Materials, welches unter Einsatzbedingungen einer hohen Beanspruchung bei gleichzeitig zu fordernder unbedingter Zuverlässigkeit ausgesetzt ist.

und an eine die Kippspiegeleinstellungen sowie die Werkstückposition steuernde Steuereinrichtung (5) angeschlossen ist.

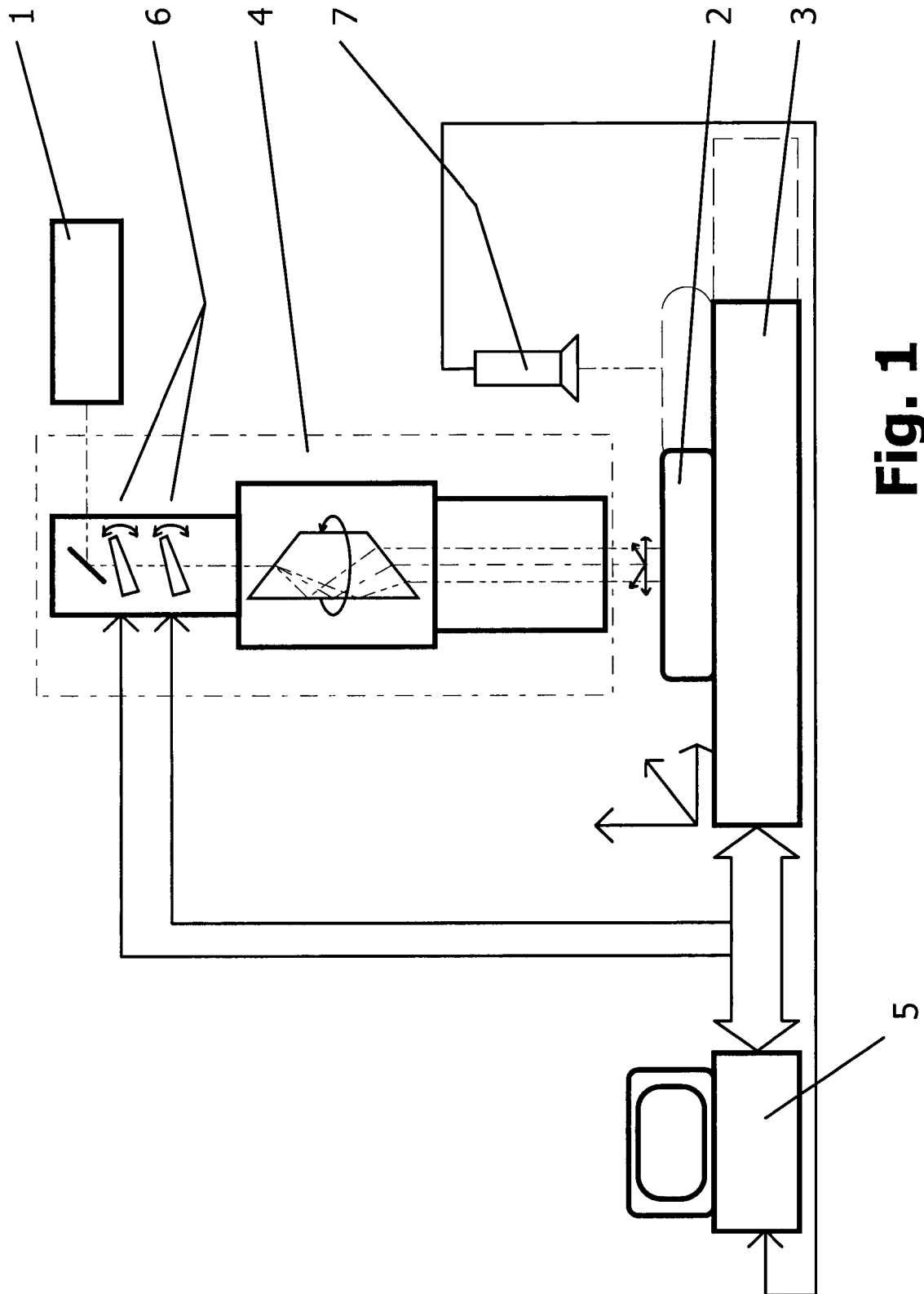
Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

**[0024]** Zur Fehlerdiagnostik und Qualitätskontrolle hochintegrierter Schaltkreise sowie andere Mikrostrukturanalysen wird das Ionenstrahl-Böschungszätzverfahren eingesetzt. Dabei wird über eine abschattende Maske die Oberfläche einer zu untersuchenden Probe einer möglichst intensiven Bestrahlung mit Ionen ausgesetzt mit dem Ziel, die nicht abgeschatteten Bereiche möglichst rasch und möglichst bis zu einer großen Tiefe abzutragen. Bei typischen Halbleiterchip-Strukturen werden für eine Schnitttiefe von einigen 100 µm mehrere Stunden benötigt. Durch Anwendung der Erfindung verringert sich diese Zeitdauer erheblich, indem in einem Abstand von der Maske, der mindestens so groß sein muss wie die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone, ein gerader Schnitt oder eine mäandrierte Reihe paralleler Schnitte durchgeführt wird, so dass sich das Volumen des mittels Ionenböschungsschnitt abzutragenden Materials deutlich verringert. Dieser Grobschnitt wird entweder vor dem Platzieren der Maske oder nach deren Platzierung und erfolgter Detektion der räumlichen Lage der Maske mit einem Bildgebenden Verfahren durchgeführt. Vorzugsweise wird der Schnitt genau senkrecht zur Oberfläche des Präparats geführt.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laserschneiden eines in einer definierten Ausgangsposition angeordneten, zu bearbeitenden Werkstücks (2), indem ein in eine Rotation und eine Taumelbewegung versetzter Laserstrahl an einer vorbestimmten Position in das Werkstück (2) eindringt und von dieser Position ausgehend das Werkstück (2) mittels einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück (2) und dem Laserstrahl mit einem vorgegebenen Bahnkurve folgenden Schnittspalt versehen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jeden Bahnpunkt ein Schnittspaltwinkel vorgesehen ist, der durch Vorgabe des Auftreffwinkels und des Strahlrotationsdurchmessers des Laserstrahls eingestellt wird.

2. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Werkstück (2) in einer Laser-Bearbeitungseinrichtung angeordnet ist, die eine Wendelbohroptik (4) mit zwei motorisch verstellbaren Kippspiegeln (6) und eine Werkstückpositioniervorrichtung (3) umfasst



**Fig. 1**

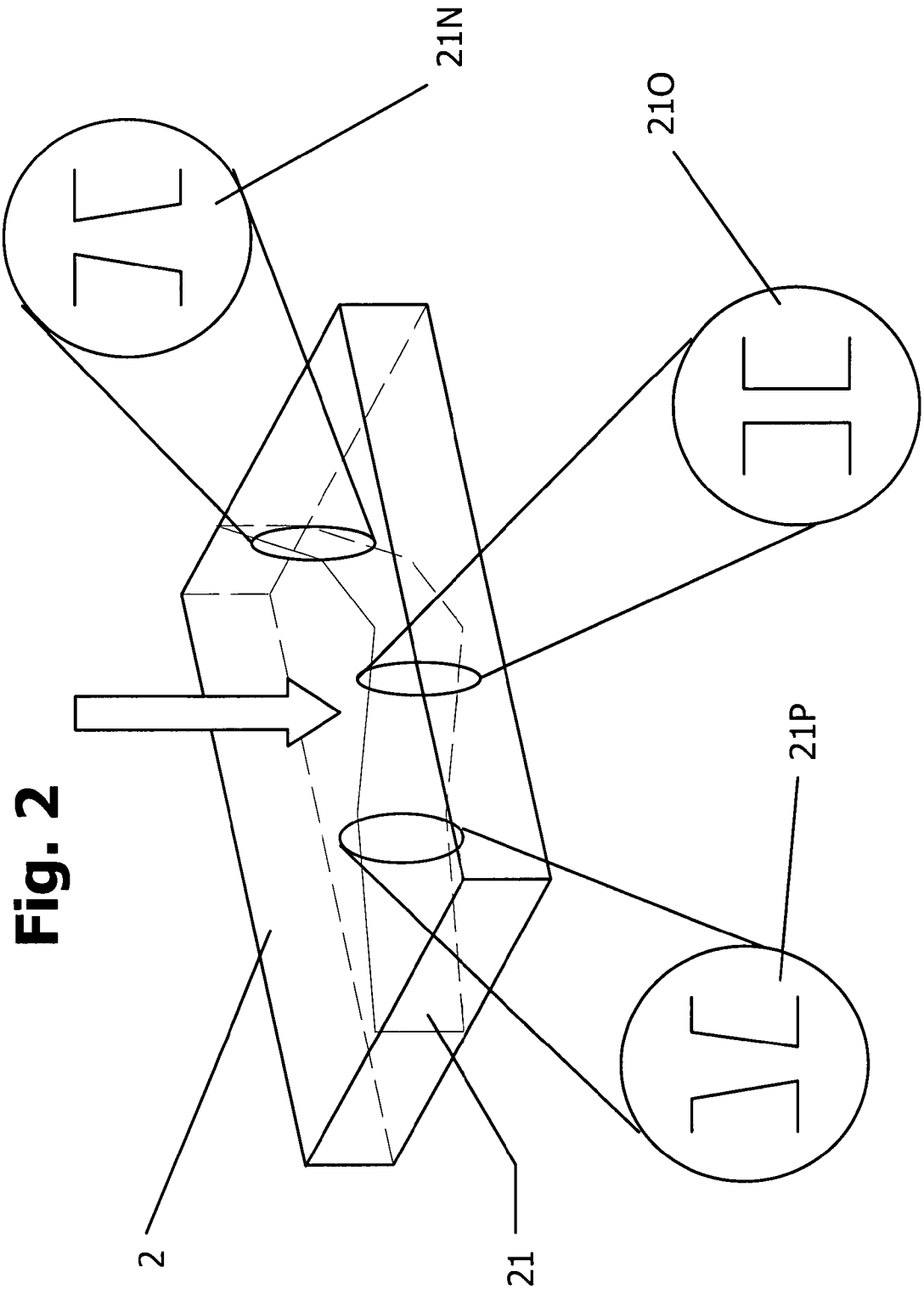
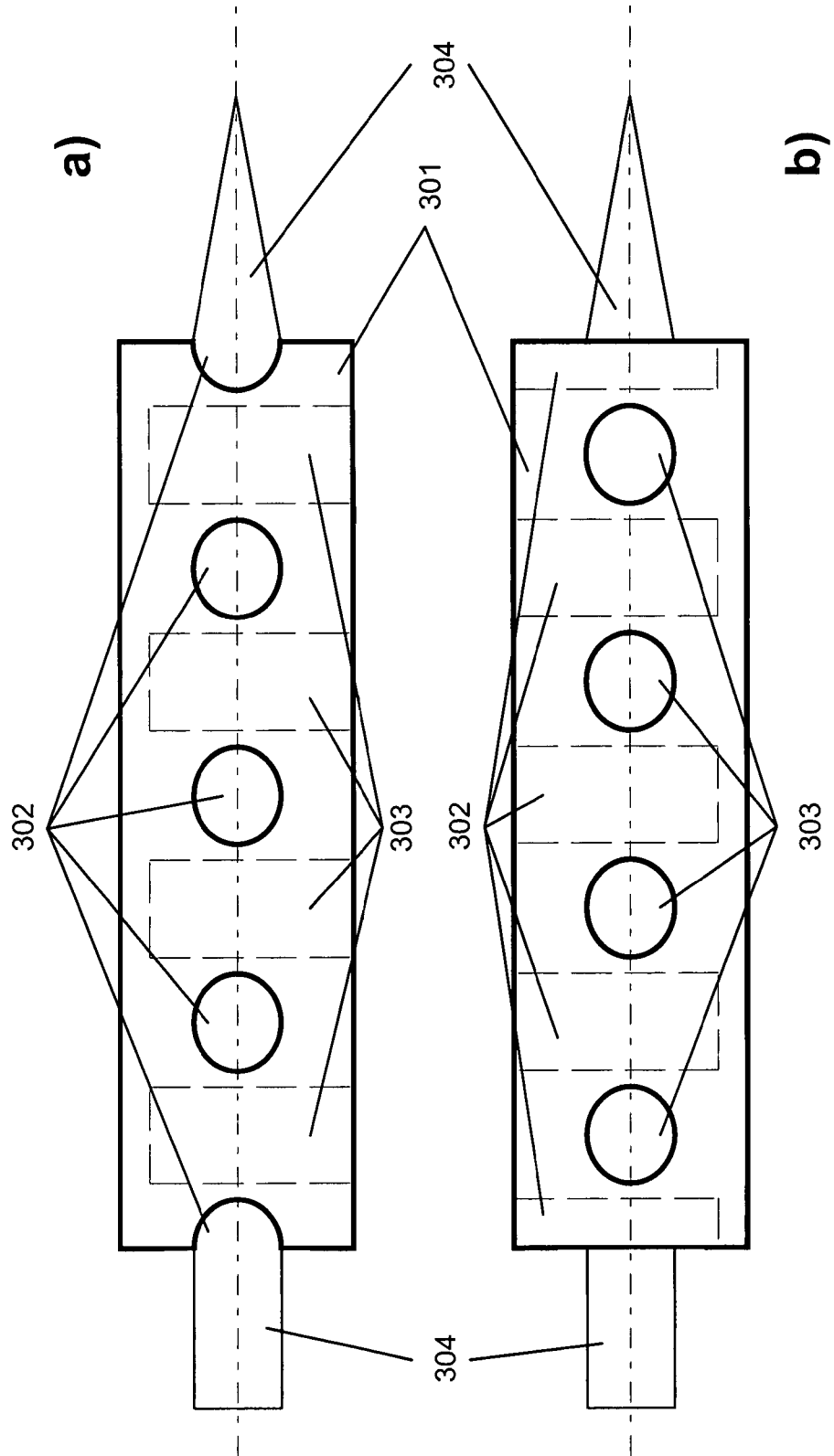
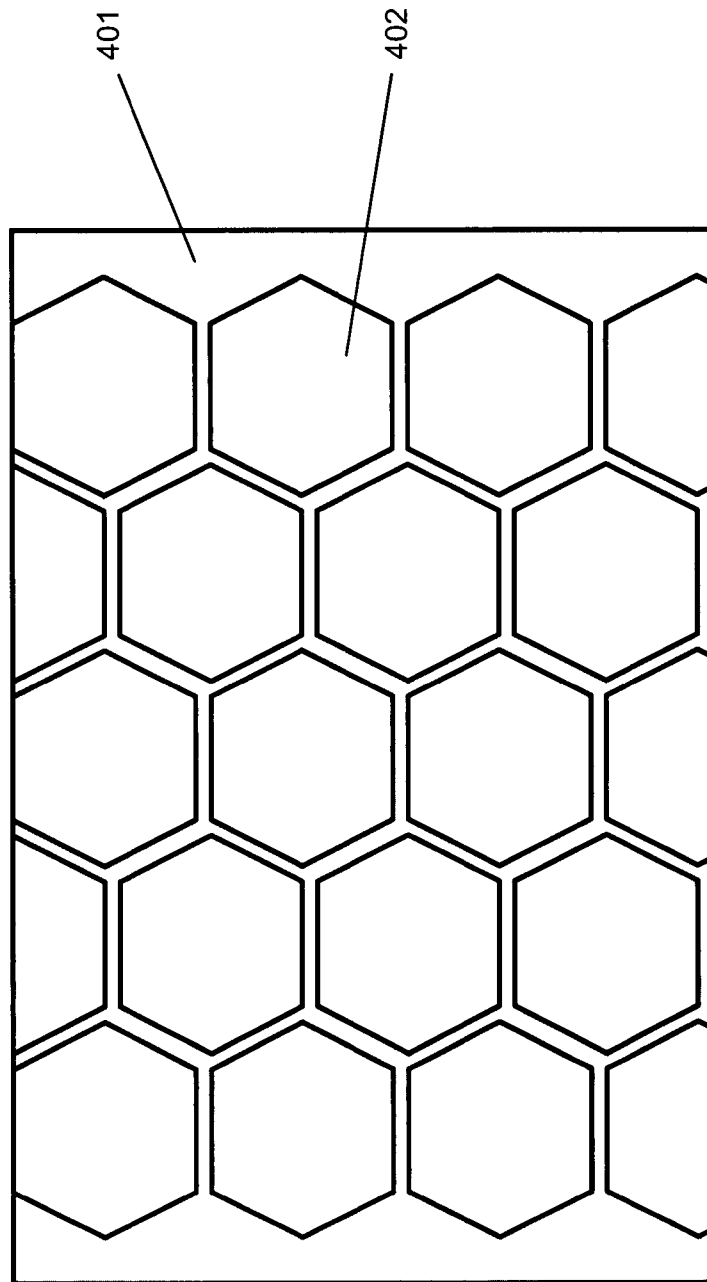




Fig. 3





**Fig. 4**