



(10) **DE 10 2009 033 206 A1** 2011.01.27

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 033 206.5**

(22) Anmeldetag: **15.07.2009**

(43) Offenlegungstag: **27.01.2011**

(51) Int Cl.⁸: **B24B 29/02** (2006.01)

B24B 37/04 (2006.01)

B24D 13/00 (2006.01)

(71) Anmelder:
Brand, Guido, 86169 Augsburg, DE

(72) Erfinder:
Urbach, Jan-Peter, Dr., 86391 Stadtbergen, DE

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

DE 100 65 380 B4

DE 10 2006 058321 A1

DE 101 13 599 A1

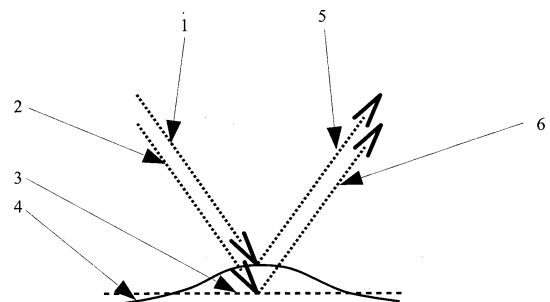
DE 699 19 230 T2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Polierverfahren und Poliervorrichtung zur Korrektur von geometrischen Abweichungsfehlern auf Präzisionsoberflächen**

(57) Zusammenfassung: Beschrieben werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Polieren und zur Formgebung von Werkstückoberflächen, bei dem die Maßabweichungen von der gewünschten Geometrie ermittelt werden, eine elastische Oberfläche (19) auf die Werkstückoberfläche (14) aufgesetzt wird und die Werkstückoberfläche durch Erzeugen eines Druckes der elastischen Oberfläche auf die Werkstückoberfläche und Bewegen der elastischen Oberfläche und der Werkstückoberfläche relativ zueinander poliert wird. Dabei ist das Material der elastischen Oberfläche so gewählt, dass es eine dynamische Abhängigkeit in der Art aufweist, dass die Kraft, welche notwendig ist, um eine zeitlich variierende Deformation in dem Material zu erzeugen, für rasche Deformationen größer ist als für langsame Deformationen.



Beschreibung

Technisches Gebiet der Erfindung

[0001] In vielen technischen Anwendungen werden Oberflächen einer wohldefinierten Gestalt benötigt. Der Grad der Abweichung der tatsächlichen Gestalt von einer im technischen Verfahren angenommenen ist dabei entscheidend für die Anwendbarkeit.

[0002] Beispiele von Anwendungen, bei denen die Genauigkeit solcher wohldefinierten Oberflächenformen eine wesentliche Rolle spielen sind:
Oberflächen von optischen Elementen wie Linsen und Spiegel.

[0003] In optischen Systemen werden die gewünschten Abbildungseigenschaften dadurch erreicht, dass das elektromagnetische Feld des verwendeten Lichtes mit Hilfe der Brechung (Linsen) und der Reflexion (Spiegel) an wohldefinierten Grenzflächen von Materialien unterschiedlicher optischer Eigenschaften in der gewünschten Art und Weise beeinflusst wird. Die tolerierbaren Abweichungen von der idealen Oberflächenform liegen dabei im Bereich von Bruchteilen der Wellenlänge. Je geringer die Abweichung desto größer ist die Güte der optischen Abbildung. Gerade für optische Systeme mit hohen numerischen Aperturen wie sie zum Beispiel in den Projektionssystemen für die Halbleiterlithographie verwendet werden, kommt erschwerend hinzu, dass die Form der optischen Grenzflächen nicht mehr durch eine einfache Kugeloberfläche genähert werden kann, sondern asphärische Geometrien notwendig sind.

[0004] Planarität von zu strukturierenden Oberflächen in der Halbleiter- und Mikrosystemfertigung:
In der Halbleiterfertigung werden die elektronischen Bauteile mit Hilfe von lithografischen Strukturierungsverfahren auf Siliziumsubstraten aufgebaut. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit versucht man dabei, die Abmessungen der Bauteile (insbesondere der Transistoren) immer kleiner zu fertigen, um die Zahl der Bauteile pro Siliziumflächeneinheit zu erhöhen. Die dabei verwendeten optischen Abbildungsverfahren werden mit steigendem Auflösungsvermögen auch immer empfindlicher gegenüber Defokusfehlern, d. h. insbesondere auch Abweichungen von der zu strukturierenden Oberfläche von der Fokusebene des optischen Systems. Daher ist es notwendig, die zu strukturierenden Oberflächen möglichst planar zu bekommen. Dies gilt sowohl für die Oberfläche der Ausgangsubstrate als auch für die Oberfläche von Zwischenschichten. Beispielsweise müssen die Oberfläche von dielektrischen Schichten, die die elektronischen Bauteile von der darüberliegenden Metallisierungsebene oder aufeinanderfolgende Metallisierungsebenen voneinander isolieren, sehr eben sein.

[0005] Planarität von Maskensubstraten in der EUV (extreme ultraviolet) Lithographie Um den oben angesprochenen Trend zu immer kleineren Strukturgrößen in der Halbleiterfertigung weiter zu verfolgen, ist man darauf angewiesen kleinere Wellenlängen als die derzeit eingesetzten zu verwenden. Ein weit verbreiteter Ansatz ist es, weiche Röntgenstrahlung mit einer Vakuumwellenlänge von etwa 13.5 nm zu verwenden. Für diese Strahlung ist kein hinreichend transparentes Material zur Verwendung in refraktiven optischen Elementen bekannt. Daher werden optische Systeme ausschließlich aus reflektiven Elementen aufgebaut. Um den einfallenden vom reflektierten Strahl räumlich zu trennen, wird mit Einfallswinkeln gearbeitet, die leicht vom senkrechten Einfall abweichen (typischerweise 6 Grad). Für die Photomaske, die das abzubildende Schaltkreis-muster trägt, ergibt sich daraus wiederum eine sehr strikte Anforderung an die Planarität der Oberfläche. Wie in [Fig. 1](#) dargestellt, übersetzt sich jede lokale vertikale Abweichung in einen lateralen Versatz der abbildenden Strahlen. Ein einfallender Strahl (2) wird von der ideal planaren Oberfläche (3) reflektiert (Strahl (6)). Eine von der idealen Oberfläche abweichende Oberfläche (4) reflektiert einen an derselben Stelle einfallenden Strahl (1) in einer anderen Höhe. Dadurch wird in dem reflektierten Strahl (5) ein Versatz gegenüber dem von der ideal planaren Oberfläche reflektierten Strahl (6) erzeugt.

Festplattenscheiben:

[0006] Bei den heute gängigen magnetischen Massenspeichern, den sogenannten Festplattenlaufwerken, wird die binäre Information als Polarisationsrichtung einer kleinen magnetischen Domäne abgespeichert. Die Domänen werden durch eine magnetische Schicht gebildet, die auf einer schnell rotierenden Scheibe aufgebracht ist. Zum Lesezugriff muss ein magnetischer Sensor in sehr geringem Abstand über die magnetische Schicht geführt werden, um die Polarisationsrichtung der Domänen zweifelsfrei messen zu können. Um die dafür notwendige geringen Abstände zwischen Lesekopf und magnetischer Schicht bei den erforderlichen hohen Lesegeschwindigkeiten zu ermöglichen, muss die magnetische Schicht auf einem sehr ebenen Substrat aufgebracht werden.

[0007] Typischerweise dürfen bei den geschilderten Anwendungen die Abweichungen von der Sollgeometrie nur wenige Nanometer betragen,

[0008] Zur Vereinfachung wird im Folgenden mit dem Begriff „Werkstückoberfläche“ nur derjenige Teil der Oberfläche des Werkstückes bezeichnet, für den die Anforderungen in Bezug auf Formabweichung und Rauigkeit gelten soll.

[0009] Es ist in der technischen Optik üblich gekrümmte Oberflächen, die von der sphärischen Geometrie abweichen in sogenannte Asphären und Freiformflächen einzuteilen, wobei der erste Begriff solche Flächen bezeichnet, die noch eine Rotationssymmetrie aufweisen. Da diese Unterscheidung für die Anwendung des hier offengelegten Verfahrens nicht wesentlich ist, werden im folgenden die Begriffe „Freiformfläche“ und „asphärische“ Fläche oder kurz „Asphäre“ als synonyme Begriff für eine von der Kugelform abweichende gekrümmte Oberfläche verwendet.

[0010] Um die oben beschriebenen Anforderungen an die Formabweichungen von Oberflächen zu erreichen, werden nach dem Stand der Technik Polierverfahren eingesetzt. Die Notwendigkeit für solche Polierverfahren entsteht daraus, das die vorangegangenen Prozessschritte eine nicht tolerierbare Oberflächenrauigkeit hinterlassen haben.

[0011] Für optische Bauteile und auch Wafersubstrate sind dies mechanische Bearbeitungsverfahren wie Sägen, Schleifen oder Fräsen mit welchen die Werkstückoberfläche in die gewünschte Form gebracht wird.

[0012] Im Falle der Halbleiterfertigung und bei der Fertigung von Mikrosystemen entsteht die Rauigkeit dadurch, dass ein integrierter Schaltkreis oder ein Mikrosystem aus mehreren Schichten von lokal abgegrenzten Bauteile endlicher Höhe aufgebaut wird. Die Bauteile werden üblicherweise mit Hilfe von lithografischen Verfahren hergestellt, die eine endliche Abbildungstiefe haben. Die Bauteilhöhe in einer Schicht erzeugt intrinsisch eine Oberflächenrauigkeit, die sich nachteilig auf die lithografische Strukturierung der nachfolgenden Bauteilebene auswirkt.

[0013] Polierverfahren haben die Aufgabe, die aus den vorangegangenen Prozessschritten übrig gebliebene Oberflächenrauigkeit auf das erforderliche Maß zu reduzieren, ohne jedoch die Oberflächenform über das tolerierbare Maß hinaus zu verändern.

Flächenpolierverfahren

[0014] Zu diesem Zweck werden Formkörper aus nichtdeformierbaren Materialien verwendet, deren Form der Negativabdruck der Werkstückoberfläche ist, im folgenden auch Polierkissenträger genannt. Auf diese Formkörper werden Polierkissen aus elastischen Materialien befestigt.

[0015] Der so entstandene Polierkopf wird durch eine geeignete mechanische Vorrichtung unter einem definierten Druck auf die Werkstückoberfläche gedrückt. Gleichzeitig werden das Werkstück und der Polierkopf derart in Bewegung versetzt, dass ihre Oberflächen eine Relativbewegung zueinander ausführen.

[0016] In den Spalt zwischen Polierkissen und Werkstück wird eine sogenanntes Poliermittel gegeben, Dies ist typischerweise eine Suspension aus sehr kleinen Polierpartikeln eines hinreichend harten Materials. Weiterhin sind in der Flüssigkeit gegebenenfalls geeignete Reagenzien für einen chemischen Angriff des zu polierenden Materials gelöst.

[0017] Die Polierpartikel in der Suspension werden vom Polierkissen gegen die Werkstückoberfläche gedrückt und gleichzeitig durch die Relativbewegung über die Oberfläche bewegt. Diese Kombination aus Druck und Bewegung bewirkt einen Materialabtrag ähnlich dem makroskopischen Kratzen.

[0018] Dieser mechanische Materialabtrag kann durch den chemischen Angriff der Oberfläche unterstützt werden, in dem die im Schleifmittel enthaltenen Reagenzien die chemische Beschaffenheit der Oberfläche so verändern, dass der mechanische Abtrag erleichtert oder überhaupt erst ermöglicht wird.

[0019] Bei derartigen Polierverfahren kann der makroskopische Materialabtrag durch die sogenannte Preston Gleichung beschrieben werden (F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines," J. Soc. Glass Technol. 11, 214–256 (1927)). Das heißt, die Abtragsrate ist proportional dem Produkt aus Anpressdruck und Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Oberflächen. Die Proportionalitätskonstante ist der so-

genannte Prestonkoeffizient. Er ist insbesondere abhängig vom Material der Werkstückoberfläche sowie von den Eigenschaften der Poliersuspension.

[0020] Aus der Druckabhängigkeit des Materialabtrages resultiert die glättende Wirkung des Verfahrens. An lokalen Erhebungen der Oberfläche wird das elastische Polierkissen stärker eingedrückt. Daher setzt es der eindrückenden Oberfläche einen stärkeren Widerstand entgegen. Diese lokale Druckverstärkung bewirkt nach der oben erwähnten Preston'schen Gleichung einen größeren Materialabtrag als in der tiefergelegenen Umgebung. Dadurch wird die lokale Erhebung schneller abgetragen. Dieser Effekt setzt sich solange fort, bis die Kompression des Polierkissen über die gesamte Kontaktfläche gleich ist. Dann herrscht überall der gleiche Anpressdruck und die Oberfläche des Werkstücks wird nur noch gleichmäßig abgetragen.

[0021] Es ist unmittelbar klar, dass bei diesem Verfahren die Oberflächenform des Werkstückes sich nach und nach der Form des Polierkopfes anpassen wird, und zwar um so stärker, je länger der Poliervorgang dauert. Für ebene Werkstücke bedeutet dies, dass der Polierkissenträger und das Polierkissen selbst sehr eben gearbeitet sein muss, damit auch das Werkstück eben bleibt.

[0022] Für das Polieren von asphärischen Flächen und Freiformflächen stellt diese Tatsache eine prinzipbedingtes Problem dar. Um die Relativbewegung zwischen Polierkissen und Werkstück zu realisieren müssen beide Oberflächen in gewissen Grenzen laufend gegeneinander bewegt werden. Die Bedingung einer perfekten Übereinstimmung der Oberflächenform kann aber für Asphären im besten Fall nur in einem Punkt gewährleistet werden. In leicht verschobenen Positionen treten Anpassungsabweichungen auf.

[0023] Darüber hinaus ist es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht möglich für jede Freiformfläche einen dedizierten Polierkopf bereitzustellen. Stattdessen hält man üblicherweise einen mehr oder minder großen Satz an Polierköpfen unterschiedlicher Krümmungsformen vor und wählt je nach Anwendung den passendsten aus. Diese nur näherungsweise Anpassung der Oberflächengeometrie vergrößert den Formfehler zusätzlich.

[0024] Zur Lösung dieses Problems sind Verfahren und Vorrichtungen bekannt geworden, bei denen die Form des Polierkopfes direkt an das zu schleifende Werkzeug angepasst werden kann, etwa durch verschiebbare Metallstifte oder durch thermisch verformbare Materialien. Bei diesen Verfahren bleibt das zuvor beschriebene Problem bestehen, dass die Anpassung nur in einem Punkt exakt vorgenommen werden kann. Wegen der zum mechanischen Abtrag erforderlichen Relativbewegung, ist eine Oberflächenabweichung in den anderen Punkten nicht zu vermeiden. Darüber hinaus kann eine durch die vorangegangenen Arbeitsschritte verursachte Formabweichung nicht mehr korrigieren, da sie ja in das Polierwerkzeug eingeprägt wird.

Lokale Polierverfahren

[0025] Zur Vermeidung dieser Probleme bei Verwendung von großflächigen Polierköpfen beziehungsweise zur Korrektur der durch die flächigen Polierverfahren erzeugten Fehler, werden lokale Polierverfahren eingesetzt, die es erlauben lokale Korrekturen der Oberflächenform anzubringen und dabei die Rauigkeit nicht über ein tolerierbares Maß zu erhöhen.

[0026] Eine Gruppe von solchen Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass das Polierwerkzeug so ausgeführt ist, dass das Polierkissen entweder an sich nur eine geringe Ausdehnung hat (z. B. bei den sogenannten Polierstiften) oder so geformt und geführt wird, dass zu jedem Zeitpunkt sich nur eine kleine Fläche im Kontakt mit dem Werkstück befindet.

[0027] Genau wie bei den flächigen Polierverfahren wird durch eine geeignete Bewegung des Polierwerkzeuges eine Relativbewegung zwischen Werkstück- und Polierkopfoberfläche erzeugt. Diese Relativbewegung erzeugt unter Zugabe einer Poliersuspension und unter Beaufschlagung eines geeigneten Drucks einen auf die Kontaktfläche begrenzten Materialabtrag.

[0028] Die abgetragene Höhe wird dadurch gesteuert, wie lange der Polierkopf an einer bestimmten Stelle auf der Werkstückoberfläche polierend verweilt. Zur Korrektur von Oberflächenabweichungen von der Sollgeometrie, die aus vorangegangenen Messungen bekannt sind, werden die entsprechenden lokalen Polierdauern bestimmt.

[0029] Nachteilig bei diesen Verfahren ist die im Vergleich zu den Flächenpolierverfahren kleine Kontaktfläche zwischen Polierkopf und Werkstück, die zu langen Prozesszeiten und damit zu hohem Verschleiß des Polierkopfes führt.

[0030] Nachteilig ist außerdem, dass die Korrektur von Sollabweichungen auf solche Abweichungen beschränkt ist, deren lateralen Abmessungen mindestens so groß sind, wie die Kontaktfläche. Diese liegen typischerweise im Bereich von wenigen Millimeter.

[0031] Eine andere Gruppe von lokalen Polierverfahren bilden die sogenannte magneto-rheologischen Verfahren. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass die Poliersuspension neben den Polierkörnchen auch magnetisierbare Partikel enthält. Die Poliersuspension wird auf einen Tragkörper aufgebracht und kann dann mit Hilfe eines starken Magnetfeldes verfestigt. Durch die Form des Tragkörpers und der Magnetlinien lässt sich wiederum eine kleine Kontaktfläche zwischen Werkstück und Polierkopf (hier der Tragkörper mit der magnetisch verfestigten Suspension) einstellen.

[0032] Der weitere Poliervorgang gestaltet sich analog zu den oben beschriebenen Verfahren.

[0033] Nachteilig an diesen Verfahren ist, dass nur relativ geringe Abtragsraten erzielt werden können. Das hängt damit zusammen, dass die Poliersuspension durch das Magnetfeld nicht sehr stark verfestigt werden kann.

[0034] Eine weitere Methodik die nach dem Stand der Technik zur lokalen Nachbearbeitung eingesetzt wird, besteht darin, die in der Poliersuspension gelösten Partikel nicht durch einen festen Körper auf das Werkstück aufzudrücken, sondern allein durch einen schnell fließenden Flüssigkeitsstrom. Eine solches Verfahren ist beispielsweise in DE 101 13 599 A1 beschrieben. Hier fließt der Flüssigkeitsstrom durch einen Ringspalt, der zwischen einer Austrittsdüse und der Werkstückoberfläche gebildet wird.

[0035] Durch den fehlenden direkten mechanischen Anpressdruck der Polierpartikel sind die erreichbaren Abtragsraten sehr gering. Außerdem gilt mindestens im Fall der in DE 101 13 599 A1 beschriebenen Vorrichtung, dass die Dimension der Austrittsdüse die laterale Ausdehnung der korrigierbaren Abweichungen nach unten begrenzt.

[0036] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde die beschriebenen Nachteile der bestehenden Polierverfahren zu verbessern. Insbesondere ermöglicht es die Erfindung, Formabweichungen zu korrigieren deren laterale Ausdehnung kleiner ist, als der Bereich, der mit den bestehenden Verfahren (d. h. in der Regel wenige Millimeter) poliert werden kann. Daneben werden die erforderlichen Polierzeiten verkürzt, was zum einen hilft, die Oberflächentreue (d. h. die Genauigkeit mit der die gewünschte Oberflächenform erreicht wird) zu verbessern und zum anderen den Verbrauch bzw. Verschleiß an Prozessmitteln zu verringern. Eine weitere Aufgabe besteht darin, aus den Prozessparametern eine möglichst genaue und einfache mathematische Modellierung der Oberflächengeometrie nach dem Polieren zu erhalten. Eine solche Modellierung ermöglicht es, die Geometrie etwaig verbleibender Abweichungen nach dem Polieren vorherzusagen und damit ihren Einfluss auf nachfolgende Prozessschritte und auch in der Endanwendung abzuschätzen und gegebenenfalls entsprechende Gegenmaßnahmen anzuwenden.

[0037] Wie oben beschrieben, wird die glättende Wirkung des Polierens mit elastischen Polierkissen durch die unterschiedlichen Anpressdrücke der Polierpartikel auf die Werkstückoberfläche hervorgerufen. Diese Unterschiede resultieren dadurch, dass eine lokale Erhebung der Werkstückoberfläche relativ zur undeformierten Oberfläche des Polierkissens eine Deformation in dem Polierkissen hervorruft. Diese lokale Deformation bewirkt eine elastische Gegenkraft in dem elastischen Medium, mit der die Polierkissenoberfläche die Polierpartikel auf die Werkstückoberfläche drückt.

[0038] Für Deformationen die wesentlich kleiner sind als die Ausdehnung des Polierkissens in Richtung der Deformation ist die elastische Kraft proportional zur Deformation selbst. Die Proportionalitätskonstante ist die sogenannte Federhärte. Wird die Federhärte auf die Ausdehnung des Kissens bezogen so erhält man eine charakteristische Materialeigenschaft, das sogenannte Elastizitätsmodul (im Englischen auch Young's modulus genannt).

[0039] Die glättende Wirkung des oben beschriebenen Polierprinzips ist umso rascher, je härter das Material des verwendeten Polierkissens ist. Ein hartes Material (d. h. mit einem großen Elastizitätsmodul) wird einer gegebenen Eindrückung durch eine lokale Unebenheit der Werkstückoberfläche eine größere Kraft entgegensetzen als ein weiches Material. Dadurch ist auch der lokale Abtrag an der lokalen Unebenheit größer und die Unebenheit wird schneller eingeebnet.

[0040] In vielen elastischen Materialien, insbesondere in Polymeren, ist das Elastizitätsmodul davon abhän-

gig, ob die Deformation statischer oder dynamischer Natur ist, das heißt genauer mit welcher Geschwindigkeit eine bestimmte Deformation erreicht wird. Dieses Verhalten beschreibt man üblicherweise durch ein frequenzabhängiges, komplexwertiges Elastizitätsmodul. Eine in der Zeit sinusartig varierende Kraft wird auch eine ebenso varierende Deformation hervorrufen. Die maximale Amplitude der Deformation ist dabei proportional zur maximalen Amplitude der angelegten Kraft, wobei die Proportionalitätskonstante jetzt der Betrag des (komplexen) Elastizitätsmodul ist. Die Phase des Elastizitätsmodul beschreibt eine etwaige zeitliche Verzögerung zwischen der Kraft und der Deformation.

[0041] In vielen Polymeren wächst des Elastizitätsmodul mit steigender Frequenz an. Dieser Anstieg hat seine Ursache in einem sogenannten Glasübergang und ist insbesondere in der Nähe einer sogenannten Glasübergangsfrequenz besonders stark, während er für sehr kleine und sehr große Frequenzen eine Sättigung aufweist. Das Elastizitätsmodul oberhalb und unterhalb der Glasübergangsfrequenz kann sich um einen Faktor 10 oder mehr unterscheiden. Eine typische Frequenzabhängigkeit ist in [Fig. 2](#) gezeigt, die den Glasübergang eines Polyurethans (PTMG2000/MDI3/BDO/DMPD) zeigt. Die Werte für das Schermodul (Kurve (8) gekennzeichnet durch o) und für den Verlustfaktor (Kurve (7) gekennzeichnet durch □) bei Raumtemperatur sind gegen den dekadischen Logarithmus der Frequenz auf der x-Achse (9) angetragen. Die Kurve für das Schermodul bezieht sich auf die linke y-Achse (10) in Einheiten von Pascal, während sich die Kurve für den Verlustfaktor auf die rechte y-Achse (11) in dimensionslosen Einheiten bezieht. (Aus: J. V. Duffy, G. F. Lee, J. D. Lee, and B. Hartmann, in R. D. Corsaro, and L. H. Sperling, eds., *Sound and Vibration Damping with Polymers*, (ACS Symposium Series 424), ACS Press, Washington, D. C., 1990, pp. 281–300).

[0042] Das in der [Fig. 2](#) gezeigte Schermodul ist bis auf den Faktor $2(1-\mu)$ identisch zum Elastizitätsmodul. Dabei bezeichnet μ die Poissonzahl, welche für die meisten Polymere unabhängig von der Frequenz bei ungefähr 0.5 liegt.

[0043] Diese Frequenzabhängigkeit kann in guter Näherung durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$E(\omega) = E_0 + (E_\infty - E_0) \frac{\omega^2 / \omega_{tr}^2}{1 + \frac{\omega^2}{\omega_{tr}^2}} \quad (\text{F1})$$

[0044] Dabei ist E_0 das statische Elastizitätsmodul und E_∞ das Elastizitätsmodul im Limes unendlicher Frequenzen. ω_{tr} ist die Glasübergangsfrequenz. Eine genauere Beschreibung des Glasübergangs gelingt mit dem Havriliak-Negami Model. In beiden Modellen ist die Frequenzabhängigkeit eine Funktion des Verhältnisses zwischen der Frequenz und der Glasübergangsfrequenz ω_{tr} .

[0045] Der Anstieg des frequenzabhängigen Elastizitätsmodul hat zur Folge, dass langsame Veränderungen der Deformation eine kleinere Kraft erfordern als schnelle.

[0046] Tatsächlich ist die Deformation eines Polierkissens während des Poliervorganges dynamisch. Die Relativbewegung zwischen der Werkstückoberfläche und dem Polierkissen führt jeden Punkt des Polierkissens eine gewisse Strecke über die Werkstückoberfläche. Betrachtet man die Strecke welche ein bestimmter Punkt der Polierkissenoberfläche auf der Werkstückoberfläche zurücklegt, so bewirkt jede Unebenheit in der Werkstückoberfläche entlang dieser Strecke eine zeitlich variierende lokale Deformation des Polierkissens in dem betrachteten Punkt.

[0047] Der zeitliche Verlauf der Deformation wird bei gegebener Relativbewegung zwischen Polierkissen und der Werkstückoberfläche von der lateralen Form der Unebenheit bestimmt. Eine weit ausgedehnte Unebenheit vermittelt bei identischer Höhe eine langsamere Deformation im Polierkissen als eine wenig ausgedehnte Unebenheit. Aufgrund der dynamischen Abhängigkeit des Elastizitätsmodul ist dann aber in Punkten identischer Höhe beider Unebenheiten die elastische Kraft im Falle der weit ausgedehnten Unebenheit immer kleiner als in den entsprechenden Punkten der weniger ausgedehnten Unebenheit. Dieser Unterschied resultiert aus dem Anstieg des Elastizitätsmodul (genauer dessen Betrages) mit der Geschwindigkeit der Deformation. Insbesondere wäre im Falle eines ruhenden Polierkissen für beide Unebenheiten die elastische Kraft in Punkten gleicher Höhe identisch, da im statischen Fall alleine das lokale Ausmaß der elastischen Deformation die elastische Kraft bestimmt. Wegen der insgesamt kleineren Kräfte im Falle der ausgedehnten Unebenheit ist auch die Differenz zwischen der Kraft am Fuße und am Gipfel der Unebenheit kleiner als im Falle der weniger ausgedehnten. Daher wird letztere schneller eingeebnet.

[0048] Dieser Unterschied rührt nicht daher, dass bei einer weiter ausgedehnten Unebenheit mehr Material abgetragen werden muss, um eine ebene Oberfläche zu erhalten, sondern stellt einen eigenständigen Effekt dar. Am einfachsten macht man sich dies anhand zweier sinuswellenförmigen Oberflächentopographien unterschiedlicher räumlicher Frequenz klar. In diesem Fall ist die Menge des Materials, die zur vollständigen Planarisierung abgetragen werden muss, in beiden Fällen gleich, da sich das Volumen der Gräben und Erhebungen genau ausgleicht. Ein Punkt des Polierkissens, welcher senkrecht zu den Wellenkämmen über eine der beiden Oberflächen geführt wird, erfährt in diesem Fall eine in der Zeit sinusartig variierende Deformation. Wegen des oben beschriebenen elastischen Verhaltens ist die resultierende Kraftdifferenz zwischen Wellenberg und Grabenboden im Fall der kurzwelligen Obeflächentopographie größer als im langwelligen Fall. Damit ist auch die Abtragsdifferenz im kurzwelligen Fall größer mit dem Resultat, dass die Unebenheit schneller abgetragen wird.

[0049] Für die weitere Diskussion ist die Fourierzerlegung einer gegebenen Oberflächentopographie zweckmäßig. Dabei wird die Oberflächentopographie als Linearkombination von ebenen Wellen in zwei Dimensionen unterschiedlicher Richtung und Wellenlänge beschreiben. Im folgenden bezeichnen wir den Kehrwert der Wellenlänge als räumliche Frequenz.

[0050] Die im Anspruch 1 formulierte Eigenschaft an das dynamische Verhalten des Elastizitätsmodul des Polierkissens macht man sich im erfindungsgemäßen Verfahren dadurch zu Nutze, dass man die vorhandenen Abweichungen durch Aufprägen einer geeigneten kurzwelligen Oberflächenstruktur so korrigiert, dass die langwelligen Abweichungen (mit einer kleinen räumlichen Frequenz) so weit als möglich unterdrückt werden und vorteilhafterweise nur kurzwellige Abweichungen übrig bleiben, die dann im nachfolgenden Polierschritt wesentlich rascher abgetragen werden, als die ursprünglichen langwelligen Abweichungen.

[0051] Zur Ermittlung einer geeigneten kurzwelligen Oberflächenstruktur wird aus den beschriebenen elastischen Eigenschaften des Polierkissens in Kombination mit den anderen Prozessbedingungen ein mathematisches Modell abgeleitet, welches die Veränderung einer gegebenen Oberflächentopographie durch den Polierprozess zumindest näherungsweise beschreibt.

[0052] Die im Anspruch 1 formulierte Eigenschaft an das dynamische Verhalten des Elastizitätsmodul ist gleichbedeutend damit, dass ein solches mathematisches Prozessmodell den Charakter eines Tiefpasses für die räumlichen Frequenzen hat. Die quantitativen Eigenschaften eines solchen Prozessmodells hängen ausschließlich von den verwendeten Prozessbedingungen und -materialien ab, aber insbesondere nicht von der Form der Werkstückoberfläche.

[0053] Polierkissen aus Polyurethanen, wie sie typischerweise beim Polieren eingesetzt werden, liegen bei den typischen beim Polieren verwendeten Anpressdrücken nicht vollflächig auf der Werkstückoberfläche auf. Stattdessen haben sie aufgrund ihrer rauen Oberfläche nur mit den am weitesten herausragenden Spitzen Kontakt mit der Werkstückoberfläche. Die effektive Kontaktfläche macht nur einen Anteil im einstelligen Prozentbereich der nominellen Kontaktfläche aus (siehe C. L. Elmufdi and G. P. Muldowney, "A novel optical technique to measure pad-wafer contact area in chemical mechanical planarization," in Mater. Res. Soc. Symp. Proc., T. Y. Tsui, Y.-C. Joo, L. Michaelson, M. Lane, and A. A. Volinsky, Eds., vol. 914, 2006, pp. paper 0914-F12-06.).

[0054] Unter bestimmten Annahmen (insbesondere, dass die Häufigkeit der Polierkissensspitzen mit ihrer Höhe exponentiell abnimmt, die Spitzen im Kontaktbereich kugelförmig sind und Hertzscher Kontakt vorliegt), kann man zeigen, dass der elastische Kontakt durch ein effektives exponentielles Federgesetz beschrieben werden kann, wobei in den Vorfaktor das Elastizitätsmodul des Polierkissenmaterials linear eingeht (siehe J. Vlassak, "A model for chemical-mechanical polishing of a material surface based an contact mechanics," Journal of the Mechanics and Physics of solids, vol. 52, pp. 847-873, 2004).

[0055] Für kleine Deformationen kann man das Exponentialgesetz durch den linearen Term der Taylorentwicklung nähern. In diesem Fall folgt aus der Preston'schen Gleichung, dass die Einebnung einer sinoidalen Oberflächentopographie beim Polieren exponentiell mit der Zeit verläuft, wobei die Zeitkonstante proportional zum Wert des Elastizitätsmodul bei der resultierenden Frequenz ist, welche durch die Relativgeschwindigkeit und der räumlichen Frequenz bestimmt wird. Dieses Verhalten ist äquivalent zu einer Faltung im Ortsraum mit einer Faltungsfunktion, welche aufgrund der Frequenzabhängigkeit des Elastizitätsmodul glockenförmig ist und deren charakteristische Breite mit der Polierdauer zunimmt

[0056] Für größere Deformationen ist eine lineare Näherung des effektive Federgesetzes nicht mehr ausrei-

chend. Die Taylorentwicklung muss dann zu höheren Termen erweitert werden. Damit wird die mathematische Beschreibung des Prozesses komplizierter, denn eine Faltung im Ortsraum ist dann nicht mehr ausreichend. Die mathematische Beschreibung erfolgt vorteilhafterweise im Fourierraum des Ortsraumes. Der quadratische Term der Taylorentwicklung kann dann beispielsweise durch die Autokorrelationsfunktion des Oberflächenprofils berechnet werden.

[0057] Das grundlegende Verhalten des Polierprozesses, dass aufgrund des in Anspruch 1 beschriebenen Verlaufes des dynamischen Elastizitätsmodul, kurzwellige Oberflächenstrukturen schneller eingegeben werden als langwellige, bleibt auch bei Hinzunahme höherer Ordnungen bestehen. Diese Eigenschaft ist Grundlage des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0058] Es ist offensichtlich, dass ein Prozessmodell immer nur eine statistische Näherung für die Summe der Einzelabträge sein kann, die durch die individuellen Polierspitzen im Laufe des Poliervorganges verursacht werden. Daher ist für den Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens vorteilhaft, dafür Sorge zu tragen, dass alle Bereiche der Werkstückoberfläche, deren Form im Poliervorgang bearbeitet werden soll, mit einer hinreichend großen Anzahl von Polierkissenspitzen in Kontakt kommen. Dies bietet darüber hinaus den Vorteil, dass die gewünschte Formgebung auch in den tief liegenden Bereichen der Werkstückoberfläche ausreichend schnell erreicht wird.

[0059] Dies lässt sich beispielsweise durch eine genügend große Rauigkeit der Polierkissenoberfläche erreichen. Dadurch wird sichergestellt, dass auch in den tiefer liegenden Gebieten der Werkstückoberfläche eine große Zahl von Polierkissenspitzen aufliegt.

[0060] Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung von geschäumten Materialien für das Polierkissen vorteilhaft, da durch die Einstellung der Porengröße die Rauigkeit des Polierkissens beeinflusst werden kann. Nach dem Stand der Technik werden Polierkissen vor dem Polierprozess mit geeigneten Diamantwerkzeugen aufgeraut (konditioniert). Dabei wird die Oberfläche soweit abgetragen, dass an der Oberfläche eine offene Porenstruktur entsteht. Die Porenwände bilden dann die Spitzen, mit denen das Polierkissen beim Poliervorgang auf der Werkstückoberfläche aufliegt. Größere Poren ergeben nach dem Aufrauen eine größere Rauigkeit.

[0061] Es ist weiterhin vorteilhaft zwischen dem Polierkissen, welches direkt auf Werkstückoberfläche aufliegt und dem Polierkissenträger eine zusätzliche Zwischenschicht aus weicherem elastischem Material aufzubringen. Durch geeignete Wahl der Elastizitätsmodulen und der Schichtdicken der beiden elastischen Schichten, kann man vorteilhafterweise erreichen, dass langreichweitige Höhenunterschiede in der Werkstückoberfläche durch die weichere Zwischenschicht ausgeglichen werden. Für diese weichere Schicht eignet sich auch ein Material mit einer hohen Viskosität wie beispielsweise bestimmte Peche oder Harze. Solche Materialien bieten den Vorteil, dass ihr statisches Elastizitätsmodul null ist. Daher ist auch das dynamische Elastizitätsmodul bei niedrigen Frequenzen sehr klein. Daher vollzieht sich auch die Einebnung langwelliger Abweichungen zwischen Polierkopfoberfläche und Werkstückoberfläche, wie sie etwa bei Verwendung nur näherungsweise angepasster Polierkopfoberflächen auftreten, sehr langsam.

[0062] Wie im gegenwärtigen Stand der Technik wird vorausgesetzt, dass die Abweichungen von der gewünschten Oberflächenform an einer hinreichenden großen Zahl von Punkten auf der Werkstückoberfläche bekannt ist.

[0063] Für die Fertigung optischer Elemente wird diese Information typischerweise mit interferometrischen Messverfahren gewonnen.

[0064] Bei der Fertigung von Halbleiterbauelementen oder Mikrosystemen kann die Oberflächenform üblicherweise aus den Platzierungsdaten der Bauelemente (d. h. den Layoutdaten) in den der vorangegangenen Ebenen und der Prozessbedingungen abgeleitet werden.

[0065] Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass für den verwendeten Polierprozess und dessen Prozessbedingungen ein Prozessmodell bestimmt wurde, welches wie oben ausgeführt, aufgrund der in Anspruch 1 formulierten Eigenschaft des Elastizitätsmodul der elastischen Oberfläche einen tiefpassartigen Charakter für die Oberflächengeometrie hat. Dies kann entweder durch empirische Messungen an Hand von geeigneten Teststrukturen oder direkt aus den Prozessbedingungen und Materialeigenschaften oder einer Kombination beider Methoden abgeleitet sein.

[0066] Der Werkstückoberfläche wird durch geeignete Verfahren (Beispiele siehe weiter unten) eine kurzwell-

lige Oberflächenstruktur aufgeprägt. Diese Oberflächenstruktur wird mit Hilfe des Prozessmodells so gewählt, dass sie in Kombination mit der bestehenden Oberflächengeometrie, (das heißt insbesondere mit den bekannten Abweichungen), nach dem Polierprozess so gut wie möglich mit der gewünschten Zieloberfläche übereinstimmt. Ziel ist es, die langwelligigen Abweichungen mit Hilfe von kurzwelligen Strukturen zu korrigieren.

[0067] Die lateralen Ausdehnungen der aufgeprägten Oberflächenstruktur sollten möglichst klein gewählt werden, um die Einebnungsdauer für die aufgeprägte Oberflächenstruktur im anschließenden Polierschritt so kurz wie möglich zu halten. Hierbei ist den etwaigen Auflösungsgrenzen des verwendeten Strukturierungsprozesses Rechnung zu tragen.

[0068] Das so präparierte Werkstück wird nun mit dem, dem Prozessmodell zu Grunde liegenden Polierverfahren poliert. Gemäß dem weiter oben beschriebenen Effekt wird die aufgeprägte kurzwellige Oberflächenstruktur wesentlich schneller eingeebnet, als die langwelligigen Abweichungen der unbehandelten Oberfläche.

Mikrostrukturierungsverfahren

[0069] Das Verfahren zum Aufprägen der Oberflächenstruktur muss es ermöglichen mit einer hinreichenden lateralen und vertikalen Auflösung die geforderte Struktur aufzuprägen. Die Experimente die zu der beschriebenen Erfindung führten, zeigen, dass vorteilhafterweise minimale Strukturgrößen im Bereich von etwa 10 µm geeignet sind, um in Kombination mit kommerziell verfügbaren Polierkissen und typischen Poliergeschwindigkeiten (z. B. 0.5 m/s) ausreichend Korrekturmöglichkeiten zu bieten.

[0070] Solche Strukturgrößen können z. B. mit Hilfe von laserbasierten lithografischen Verfahren wie sie bei der Herstellung von Photomasken für die Halbleiterfertigung üblich sind, ohne technische Schwierigkeiten auf ebenen Substraten hergestellt werden. Auf gekrümmten Substraten ist eine lithographische Strukturierung ebenfalls möglich (siehe z. B. „Laser-lithography on non-planar surfaces“ by D. Radtke and U. D. Zeitner in Optics Express, Vol. 15, Issue 3, pp. 1167–1174).

[0071] Bei diesem Verfahren lässt sich für jedes Werkstück die erforderliche Oberflächenstruktur individuell anpassen. Es ist daher sehr geeignet zur Korrektur von Einzelstücken und Kleinserien, sowie zur Korrektur von unsystematischen Abweichungen, d. h. Abweichungen die von Werkstück zu Werkstück unterschiedlich sind.

[0072] Zur Korrektur von systematischen Fehlern insbesondere bei der Fertigung von größeren Stückzahlen erscheint die Verwendung einer Photomaske sinnvoll, mit deren Hilfe man eine identische Oberflächenstruktur auf eine Vielzahl von Werkstücken belichten kann. Die Belichtung kann dann entweder als Kontaktbelichtung oder mit Hilfe einer Projektionsoptik erfolgen.

[0073] Eine Kombination beider Verfahren ist ebenfalls vorteilhaft, um sowohl systematische als auch zufällige Abweichungen zu korrigieren.

[0074] Weiterhin kann die Lackmaske auch durch hochauflösende Drucktechniken auf die Werkstückoberfläche aufgebracht werden. Vorteilhaft sind sogenannte Inkjet Verfahren, welche unter Ausnutzung von piezoelektrischen oder thermischen Verfahren, sehr kleine Flüssigkeitsmengen an vordefinierten Positionen der Werkstückoberfläche aufbringen können. Solche Verfahren sind wohlbekannt um in elektronischer Form vorliegende Bilder auf Papier zu drucken. Entsprechend lassen sich mit solchen Verfahren, die zur Korrektur notwendigen Lackmaskenstrukturen auf die Werkstückoberfläche aufbringen und anschließend analog zur Photolithographie in die Werkstückoberfläche ätzen.

[0075] Analog zur Photomaske, kann auch bei der Drucktechnik basierten Lackmaskenstrukturierung eine Druckmaske verwenden, um systematische Abweichungen an einer großen Zahl von Werkstücken einfacher zu korrigieren. Dieses Verfahren ist in der Offsetdrucktechnik wohlbekannt. Hier verwendet man Druckplatten, die mit den Bild und Textdaten bebildert werden und mit denen dann in einer Art Stempelverfahren eine große Zahl von Abzügen hergestellt werden können.

[0076] **Fig. 9** zeigt eine Vorrichtung, um das erfindungsgemäße Verfahren unter Verwendung eines lithografischen Strukturierungsverfahrens durchzuführen. Ein Roboterarm (**43**) mit einer Werkstückaufnahmeverrichtung (**44**) legt ein mit Photolack lackiertes Werkstück zunächst auf den Objektisch (**41**) einer Belichtungseinheit. Dort wird der Photolack mit Hilfe eines Laserstrahles (**40**) belichtet. Der Laserstrahl wird durch eine geeignete Optik (**39**) auf die Werkstückoberfläche fokussiert. Um an jeder Stelle der Werkstückoberfläche das geeignete Korrekturmuster in den Lack zu belichten, ist die Fokussieroptik (**39**) (oder alternativ der Objektisch

(41)) in alle drei Raumachsen verfahrbar. Anschließend legt der Roboterarm (43) das belichtete Werkstück zunächst in eine Entwicklerstation (36), in der der Lack entwickelt, d. h. je nach Lacksorte der belichtete oder der unbelichtete Lack vorteilhafterweise nasschemisch abgelöst wird. Anschließend werden in der Ätzkammer (37) die vom Lack nicht maskierten Bereiche geätzt, so dass in der Werkstückoberfläche die gewünschte Mikrostruktur entsteht. In einer Reinigungsstation (38) werden die verbliebenen Lackreste entfernt. Nun wird das Werkstück auf die Polierstation (42) gelegt und poliert.

[0077] Für das erfindungsgemäße Verfahren sind auch andere Strukturierungsverfahren denkbar, wie zum Beispiel Mikrogravieren, Laserablation oder Mikroätzen. Solche Verfahren haben gegenüber der Mikrolithographie den Vorteil, dass nicht nur die laterale Dimensionen sondern auch die lokale Strukturierungstiefe zur Korrektur der Oberflächenabweichung innerhalb eines Prozessschrittes variiert werden kann. Außerdem erfolgt der Materialabtrag direkt (also ohne Umweg über eine maskierte Ätzung). Durch die einfachere Prozessführung ist eine direkte Integration in eine Poliervorrichtung möglich. Dadurch können die Strukturierung und das Polieren direkt in der selben Werkstückhalterung erfolgen, wie in [Fig. 10](#) gezeigt.

[0078] Zur Vereinfachung der Darstellung wird ein planares Werkstück (50) dargestellt. Das Werkstück ist auf einem Halter (49) angebracht, welcher durch die Welle (48) in Drehung versetzt wird. Auf dem Polierkissenträger (52) ist das Polierkissen (51) angebracht. Beide werden über die Welle (54) ebenfalls in Rotation versetzt und darüber hinaus gegen das Werkstück gepresst. Über die Poliersuspensionszuführung (58) wird die Poliersuspension (45) auf die Werkstückoberfläche aufgebracht und verteilt sich (durch (57) angedeutet) dort insbesondere auch in den Zwischenraum zwischen Polierkissen (51) und Werkstück (50). Für das Aufprägen der verfahrensgemäßen Mikrostruktur ist eine Vorrichtung zur Laserablation in die Poliermaschine integriert. Eine geeignete Optik (46) fokussiert einen Laserstrahl (47) auf die Werkstückoberfläche. Die Optik ist in der Ebene parallel zu Oberfläche verfahrbar um an jedem Punkt der Werkstückoberfläche die geeignete Mikrostruktur aufzuprägen. Für gekrümmte Oberflächen kann die vertikale Position des Laserstrahl aufzuprägen. Für gekrümmte Oberflächen kann die vertikale Position des Lasersfokus durch eine geeignete Optik oder durch Verfahren der Optik selbst variiert werden.

[0079] Neben den beschriebenen materialabtragenden Strukturierverfahren können auch materialaufbringenden Verfahren eingesetzt werden. So können zum Beispiel schichtabscheidende Verfahren unter Verwendung einer entsprechend strukturierten Lochmaske angewandt werden. Auch hochauflösende Drucktechniken können bei geeigneter Wahl der Prozessparameter eingesetzt werden. Eine solche Anwendung erscheint insbesondere vorteilhaft für den Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahren bei reflektiven optischen Elementen. In diesem Fall sind die optischen Eigenschaften des Substrates unwichtig, da die Reflektion an einer nachträglich aufgedampften dünnen Schicht erfolgt.

[0080] Bei den materialaufbringenden Strukturierungsverfahren ist es eventuell unvermeidlich, dass der Polierprozess das zu Strukturierung aufgebrachte Material schneller oder langsamer abträgt, als das Material der Werkstückoberfläche. Dieser Unterschied kann im Prozessmodell durch die Einführung eines ortsabhängigen Prestonkoeffizienten berücksichtigt werden. Alternativ kann auch nach dem materialaufbringenden Strukturierungsverfahren eine ausreichend dicke homogene Zwischenschicht abgeschieden werden, welche dann die neue Werkstückoberfläche bildet, die im nachfolgenden Polierschritt bearbeitet wird.

[0081] Natürlich ist es auch möglich, materialabtragende und -aufbringende Verfahren zu kombinieren.

[0082] Dies kann insbesondere vorteilhaft sein, wenn sich die Höhenabweichungen nur über einen geringen Anteil der gesamten Werkstückoberfläche erstrecken, aber sowohl in die Oberfläche hinein als auch aus der Oberfläche hinaus zeigen. In diesem Fall können die unterschiedlichen Abweichungen durch das jeweils komplementäre Strukturierungsverfahren korrigiert werden, so dass die zu strukturierende Fläche auf die Abweichungen selbst beschränkt bleibt. Ein Beispiel einer solchen Prozessfolge ist in [Fig. 11](#) gezeigt. In denjenigen Bereichen, in denen die Abweichung der Werkstoffoberfläche (60) nach außen zeigen, werden durch ein abtragendes Strukturierungsverfahren lokal Material abgetragen (61). In den Bereichen, in denen die Abweichungen nach innen zeigen, werden durch ein materialaufbringendes Verfahren lokal Material (62) aufgebracht. Dann wird eine homogene Schicht (63) aufgebracht, die so dick ist, dass sie während der Polierdauer, die notwendig ist, um die verbleibenden Höhenunterschiede einzuebenen, nicht vollständig abgetragen wird. Der Polierprozess erzeugt dann eine ebene Oberfläche (64) der Schicht (63).

[0083] Um trotz eines begrenzten Auflösungsvermögens eines verwendeten Strukturierungsverfahren ein hohes dynamisches Elastizitätsmodul für die aufgeprägte Mikrostruktur zu erreichen, kann ein elastisches Material gewählt werden, dessen Glasübergangsfrequenz auf das Auflösungsvermögen des eingesetzten Strukturi-

rierungsverfahrens abgestimmt ist.

[0084] Die elastischen Eigenschaften vieler Polymere lassen sich aus den Beiträgen der einzelnen Monomere über sogenannte Gruppenbeitrags- oder Fragmentmethoden ableiten. Dies gilt insbesondere auch für die Frequenzabhängigkeit des Elastizitätsmodul. So konnten Davis und Szabo die Frequenzabhängigkeit von 14 Polyurethanen sehr exakt aus den Monomerbeiträgen ermitteln. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass die Glasübergangsfrequenz in den untersuchten Materialien um etwa 10 Größenordnungen variierte (siehe W. M. Davis and J. P. Szabo, „Group contribution analysis applied to the Havriliak-Negami model for polyurethanes“, *Corp. And Theor. Polymer Science*, 11 (2001), pp 9–15). Das bedeutet, dass die Glasübergangsfrequenz des verwendeten Polierkissenmaterials durch geeignete Materialsynthese in weiten Bereichen auf die Auflösung und die verwendete Relativgeschwindigkeit angepasst werden kann

[0085] Auch die Größen des statischen und des hochfrequenten Elastizitätsmodul lassen sich durch einen geeigneten Zusammensetzung des verwendeten Materials für das erfindungsgemäße Verfahren optimieren. Um den Einfluss durch langreichweitige Abweichungsfehler zwischen Polierkopf und Sollgeometrie zu minimieren, sollte das statische Elastizitätsmodul so klein wie möglich sein. Gleichzeitig sollte das hochfrequente Elastizitätsmodul möglichst groß sein, damit die aufgeprägte Oberflächenstruktur möglichst rasch eingeebnet wird.

[0086] Darüber hinaus lassen sich zwei Prozessparameter geeignet wählen, um in gewissen Grenzen die Abstimmung zwischen der Glasübergangsfrequenz und dem Auflösungsgrenzen des Strukturierungsverfahrens zu optimieren.

[0087] Zum einen verschiebt eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück- und Polierkissenoberfläche den zeitlichen Verlauf der durch eine gegebenen Mikrostruktur bewirkten Deformation zu höheren Frequenzen und erhöht damit den wirkenden Elastizitätsmodul.

[0088] Zum anderen ist die Frequenzabhängigkeit des Elastizitätsmodul temperaturabhängig. Bei geringeren Temperaturen verschiebt sich die Glasübergangsfrequenz zu kleineren Werten. Mit einer Temperaturerniedrigung erreicht man daher für eine gegebene Mikrostruktur ebenfalls höhere Werte den wirkenden Elastizitätsmodul.

[0089] Es ist offensichtlich, dass der erfindungsgemäße Prozesszyklus, bestehend aus Ermittlung der Oberflächenabweichung, Bestimmung und Aufprägen des Korrekturmusters und anschließendem Polieren, auch mehrmals hintereinander durchgeführt werden kann. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn die erreichbaren Strukturierungstiefen des gewählten Strukturierungsprozesse nicht ausreichen, um die vorhandenen Abweichungen in einem Prozesszyklus zu korrigieren. Auch kann bei mehrmaliger Anwendung in den verschiedenen Schritten unterschiedliche Strukturierungsbreiten, Polierkissenmaterialien und Prozessbedingungen eingesetzt werden, um Abweichungen auf unterschiedlichen Längen- und Höhenskalen zu korrigieren

Vorteile gegenüber dem Stand der Technik

[0090] Aus dem erfindungsgemäßen Verfahren ergeben sich eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Stand der Technik.

[0091] Die eigentliche Korrektur der langwelligen Abweichungen wird nicht mehr durch Polieren erreicht sondern durch Mikrostrukturierung. Mikrostrukturierungsverfahren weisen eine um Größenordnungen bessere (also höhere) Ortsauflösung auf, als die lokalen Polierverfahren nach dem Stand der Technik. Damit ist eine wesentlich genauere Korrektur der Abweichungen möglich, insbesondere, wenn deren laterale Ausdehnung klein ist.

[0092] Durch die Ausnutzung der dynamischen Charakteristik geeigneter elastischer Materialien für das Polierkissen wird die erfindungsgemäß eingeprägte Oberflächentopographie wesentlich schneller eingeebnet als die ursprünglichen Abweichungen. Damit reduzieren sich die benötigten Polierzeiten gegenüber dem Stand der Technik. Mit der Prozessverkürzung verringert sich auch der Verbrauch an Prozessmitteln (insbesondere weniger Energie und Schleifmittelverbrauch) sowie die Abnutzung der Polierwerkzeuge.

[0093] Darüber hinaus bietet eine verkürzte Polierdauer auch einen prinzipiellen Vorteil. Es ist verhältnismäßig aufwendig und für asphärische Flächen sogar unmöglich, die Oberfläche des Polierkissens exakt auf die gewünschte Oberfläche anzupassen. Für planare und sphärische Oberflächen muss dazu der Polierkissenträ-

ger und das Polierkissen selbst sehr exakt gearbeitet werden. Für asphärische Flächen ist eine exakte Anpassung im Allgemeinen prinzipiell nur in einem Punkt möglich. Durch die für den Polierprozess notwendige Relativbewegung, ergeben sich zu nahezu allen Zeitpunkte Abweichungen zur idealen Anpassung wegen der relativen Verschiebung des Polierkopfes aus der idealen Position. Bei sonst identischen Prozessbedingungen übertragen sich solche Anpassungsfehler um so stärker auf das Werkstück, je länger die Polierdauer ist. Eine kürzere Polierdauer, wie sie durch den erfindungsgemäßen Prozess erreicht wird, erlaubt daher eine größere Formtreue des Polierprozesses.

[0094] Weiterhin können auch die im vorigen Abschnitt beschriebene Anpassungsabweichungen des Polierkopf von der gewünschten Werkstückoberfläche ebenfalls durch die beschriebene Mikrostrukturierungskorrektur korrigiert werden.

[0095] Insbesondere für die erwähnten lokalen Polierverfahren mit Polierstiften und ähnlichen kleinen Polierköpfen, erlaubt die beschriebenen Korrektur der Anpassungsabweichungen die Verwendung von größeren Polierstiftoberflächen. Damit wird die Polierdauer für ein gegebenes Werkstück zusätzlich reduziert.

[0096] Weiterhin erfordert das erfindungsgemäße Verfahren nur einen zusätzlichen Prozessschritt, nämlich die Mikrostrukturierung, um es in bestehende Fertigungsprozesse zu integrieren. Insbesondere lässt es sich auf Flächenpolierverfahren anwenden und erlaubt bereits in diesem Prozessschritt die genauere Korrektur von lokalen Abweichungen. Außerdem reduzieren sich bei asphärischen Flächen durch die geringere Prozessdauer die durch die prinzipbedingten Fehlanpassung hervorgerufenen Geometrieabweichungen. Damit entfällt im besten Fall die Notwendigkeit für nachfolgende lokale Korrekturpolierschritte, mindestens aber werden die notwendigen Korrekturen stark reduziert. Darüber hinaus erlauben es diese Vorteile asphärische Flächen derselben Oberflächentreue mit einem verringerten Satz an Polierkopfformen zu fertigen, Dadurch werden ebenfalls Prozesskosten eingespart.

[0097] Weitere Vorteile ergeben sich bei dem Einsatz in der Halbleiterfertigung oder der Fertigung von Mikrosystemen. Dort werden die Bauelemente durch schichtweisen Aufbau hergestellt, wobei in jeder Schicht die notwendige Mikrostrukturierung durch lithographische Verfahren erfolgt. Die verwendeten lithografischen Verfahren haben in der Regel eine planare Fokusebene und eine geringe Abbildungstiefe (auch Tiefenschärfe genannt). Jede Unebenheit in der zu belichtenden Oberfläche bewirkt einen lokalen Fokusfehler und damit eine Fehler in der Breite der abgebildeten Struktur. Um diesen Fehler möglichst gering zu halten werden die Zwischenoberflächen mit oben beschriebenen chemisch mechanischen Polierverfahren plan poliert.

[0098] Der Planarisierungsmechanismus des erfindungsgemäßen Verfahrens beruht im wesentlichen auf der in Anspruch (1) formulierten Eigenschaft des Elastizitätsmodul der elastischen Oberfläche (19). Dadurch ist es möglich, die zeitliche Veränderung der Oberflächenstruktur mit relative einfachen mathematischen Mitteln sehr präzise vorherzusagen. Da in das Prozessmodell bekannte Material- und Prozesseigenschaften eingehen, kann dieses Modell für beliebige Prozessbedingungen aufgestellt werden. Damit entfallen oder verringern sich die bislang aufwändigen Prozesscharakterisierungen mit Hilfe von Topographiemessungen an definierten Teststrukturen, wie sie beispielsweise in DE000010065380B4 beschrieben werden.

[0099] Es ist nach dem Stand der Technik üblich, die Anordnung der für die Funktion des integrierten Schaltkreises notwendigen Strukturen so zu wählen, dass die Oberfläche nach dem Polieren möglichst eben ist. Auch ist es üblich, zusätzliche Strukturen (sogenannte Füllstrukturen) einzufügen oder die Form der funktional notwendigen Strukturen zu wählen, dass die Oberfläche nach dem Polieren möglichst eben ist. Die Regeln nach denen diese Veränderungen und Einfügungen vorgenommen, sind empirischer Natur und wenig genau.

[0100] Eine weit verbreiteter Ansatz ist es, die lokale Layoutdichte (das heisst den Anteil der strukturierten Fläche an einem Ort, gemittelt innerhalb einer gewissen Umgebung) auf einen bestimmten Wertebereich einzugrenzen. Der Größe des Mittelungsbereich wird durch empirische Messungen bestimmt und als eine charakteristische Länge des CMP Prozesses angesehen. Typische Werte für diese Planarisierungslänge liegen im Bereich von mehreren 100 µm bis zu wenigen Millimeter. Es ist unmittelbar klar, dass ein solcher Ansatz den Einfluss der kleinräumigen Layoutdichteveriationen nicht berücksichtigt. Es hat sich aber gezeigt, daß diese kleinräumigen Layoutdichteveriationen einen wesentlichen Teil der Höhenvariation nach dem Polieren verursachen, die insbesondere auch nicht durch ein automatisches Nachfahren der Fokusebene bei der Belichtung korrigiert werden können.

[0101] Darüber hinaus müssen solche empirischen Prozessmodelle bei jeder Änderung der Prozessbedingungen neu ermittelt werden.

[0102] Durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens können diese Regeln, ohne neuerliche empirische Charakterisierung ermittelt werden, da das Prozessmodell in definierter Art und Weise von Materialeigenschaften und Prozessparametern abhängt. Außerdem ist die Vorhersagekraft des durch das erfindungsgemäßen Verfahrens gegebenen Prozessmodells wesentlich genauer, da der Einfluss der kleinräumigen Layoutdichteveränderungen korrekt modelliert wird.

[0103] Aus dem selben Grund ist es durch den Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens möglich die Oberflächengeometrie nach dem Polierprozess sehr genau vorherzusagen. Durch diese Vorhersage ist es möglich, den Einfluss von etwaigen nicht korrigierbare Geometrieabweichungen durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren. So ist es beispielsweise möglich, einen vorhandenen Defokusfehler durch einen geeigneten Strukturbreitenvorhalt in der darauf zu belichtenden Ebenen zu kompensieren. Weiterhin ist es beispielsweise möglich, den Einfluss einer lokalen Abweichung der Dielektrizitätsschichtdicke zwischen zwei Metallebenen vom nominalen Wert simulatorisch zu untersuchen, um zu prüfen, ob die Abweichung an dieser Stelle kritisch für die Funktion des Schaltkreises ist und ihren Einfluss gegebenenfalls durch eine geeigneten Auslegung der elektronischen Bauelemente zu kompensieren.

[0104] Bei Linsenelementen ist es bei Kenntnis der systematischen Abweichungen von der Sollgeometrie möglich, die negativen Effekte durch geeignetes Design anderer oder zusätzlicher optischer Elemente zu lindern.

[0105] Die folgenden Ausführungsbeispiele für das erfindungsgemäße Verfahren werden beispielhaft anhand des Planarschleifens von Siliziumwafer erläutert. Dies liegt zum einen daran, dass für dieses Verfahren eine quantitative Prozesscharakterisierung zur Verfügung steht, anhand derer sich die Vorteile des Verfahrens beispielhaft quantifizieren lassen. Zum anderen ist die Darstellung von planaren Werkstücken in Zeichnungen einfacher und übersichtlicher zu erreichen als für gekrümmte Flächen.

[0106] Alle Anwendungsbeispiele lassen sich aber durch geeignete Poliervorrichtungen auch auf gekrümmte Flächen verallgemeinern. Der wesentliche Unterschied besteht darin einen gekrümmten Polierkissenkopf zu verwenden, der ein Negativabdruck der Werkstückoberfläche ist.

[0107] Der wesentliche Unterschied beim Polieren von Werkstücken aus anderen Materialien besteht in einer Anpassung der Polierzeiten und gegebenenfalls der Verwendung anderer Poliersuspensionen. Beide Modifikationen haben keinen Einfluss auf die wesentlichen Eigenschaften des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0108] [Fig. 3](#) zeigt die schematische Darstellung einer chemisch mechanischen Poliermaschine für Wafer-substrate. Bei dieser Anwendung soll die Waferoberfläche planar poliert werden. Der Polierkissenenträger (**15**) ist daher als Scheibe ausgeführt und das Polierkissen (**19**) als dünnes Poliertuch. Der Polierkissenenträger (**15**) wird durch eine Welle (**16**) in Rotation versetzt. Auf dem Träger ist ein Polierkissen (**19**) befestigt. Durch einen Flüssigkeitsauslass (**17**) wird die Poliersuspension (**18**) kontinuierlich auf das Polierkissen aufgebracht, so dass sie sich über dem Polierkissen und insbesondere auch zwischen den Wafer (**14**) und das Polierkissen (**19**) verteilt. Der Waferträger (**13**) presst den Wafer (**14**) mit einem einstellbaren Anpressdruck auf das Polierkissen (**19**). Über die Welle (**12**) wird auch der Waferträger (**13**) und mit ihm der Wafer (**14**) in Rotation versetzt.

[0109] Wafer und Polierkopf werden jeweils in Rotation um den jeweiligen Mittelpunkt versetzt. Die Winkelgeschwindigkeit dieser Rotationen ist so eingestellt, dass auf der gesamten Waferoberfläche dem Betrage nach dieselbe Relativgeschwindigkeit zwischen Wafer- und Polierkissenoberfläche herrscht. Die Richtung der Relativgeschwindigkeit rotiert im Bezugssystem des Wafer gleichmäßig mit der Zeit. Dadurch wird ein isotroper Abtrag erreicht, der zusätzlich in jedem Punkt des Wafers identisch ist.

[0110] Die Relativgeschwindigkeit zwischen Wafer- und Poliertuchoberfläche wurde auf etwa 0.5 m/s eingestellt. Das Polierkissen (**16**) ist ein doppellagiges Polyurethantuch. Die untere Schicht welche mit der Waferoberfläche in direktem Kontakt steht ist ein etwa 1270 µm dickes, aufgeschäumtes Polyurethantuch. Die Poren haben eine typische Größe von etwa 10 µm bis 80 µm. Die zweite Lage ist ein weiteres, dickeres Poliertuch, insbesondere mit einem geringeren Elastizitätsmodul. Der nominale Anpressdruck zwischen Wafer und Polierkissen beträgt etwa 41.4 kPa. Die Poliersuspension enthält vorteilhafterweise 30% Polierpartikel aus Siliziumoxid, die eine mittlere Größe von 50 nm haben. Eine bevorzugte Polierdauer beträgt 90 s.

[0111] Empirisch Untersuchungen zur Glättung der Oberflächentopographie als Funktion der räumlichen Frequenz haben den in [Fig. 4](#) Zusammenhang unter diesen Prozessbedingungen ergeben. Die Kurve (**21**) zeigt die Dämpfung der Amplitude (angetragen auf der y-Achse (**22**) in dimensionlosen Einheiten) von sinusoidal

Oberflächentopographien in Abhängigkeit von deren Wellenlänge (angetragen auf der oberen x-Achse (20) in μm), bzw. der räumlichen Frequenz (untere x-Achse (23) in μm^{-1}). Deutlich ist das tiefpassartige Verhalten des Polierprozesses zu erkennen. Dieses Prozessmodell resultiert aus dem durch Formel (F1) genäherten Verlauf des dynamischen Elastizitätsmodul mit einer Glasübergangsfrequenz von etwa 18000 Hz.

[0112] Als Beispiel für eine mögliche Oberflächenabweichung nehmen wir an, dass der ansonsten ideal planare Wafer mit einem Durchmesser von 300 mm an einer beliebigen Stelle eine gaussförmige Erhebung habe, die eine Höhe von 200 nm und eine Halbwertsbreite von etwa 500 μm habe. Die Oberflächengeometrie des Wafers sei aus einer interferometrischen Messung bekannt, welche eine laterale Auflösung im Bereich von 10 μm hat. In Fig. 5 ist das interpolierte Höhenprofil (24) einer solchen Abweichung als Funktion des Ortes (in μm auf der x-Achse (26)) aufgetragen. Die Nullpunkt der Höhenachse (25) ist dabei so gewählt, das sich alle Abweichungen im Mittel aufheben. Die Richtung der Höhenachse zeigt aus der Waferoberfläche hinaus. Die Höhe auf der Höhenachse sind in Einheiten von nm angegeben. Wegen der sehr geringen Ausdehnung der Erhebung ist die mittlere Höhe der Waferoberfläche nahezu identisch zur Höhe in großen Abständen von der Erhebung.

[0113] Nach Anwendung des oben beschriebenen Polierverfahrens nach dem Stand der Technik (das heißt insbesondere ohne das Aufprägen einer kurzwelligen Oberflächenstruktur) verbleibt die in Fig. 6 gezeigte Resttopographie (27) (Achsendefinition und Skalierung wie in Fig. 5). Die angenommene Abweichung wird nur um einen Faktor von etwa 4 reduziert. Der verbleibende maximale Höhenunterschied nach dem Polierprozess beträgt etwa 54 nm.

[0114] Für eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird aus dem Höhenprofil in Fig. 5 nun eine geeignete Mikrostruktur ermittelt. In diesem Beispiel gehen wir davon aus, dass ein Lithographieverfahren zur Verfügung steht, welches eine laterale Auflösung von besser als 2 μm , sowie eine Ätztiefe von $d = 400 \text{ nm}$ hat. Dann lässt sich eine geeignete Mikrostruktur auf folgende Art finden. Die zur Verfügung stehende Ätztiefe wird in 16 äquidistante Klassen unterteilt. Jeder dieser Höhenklassen wird ein 4x4 Pixelmuster zugeordnet. Ausgefüllte (schwarze) Pixel bezeichnen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ große Felder an denen geätzt wird, während bei unausgefüllten (weissen) Pixeln auf $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ großen Feldern keine Ätzung stattfindet. Die mittlere Höhe der so entstehenden lokalen Ätzmuster sind bis auf einen Offset von $d/2$ und dem Faktor „-1“ identisch zum Mittelpunkt des zugeordneten Höhenintervalls. Ein solcher Satz von lokalen Ätzmustern zusammen mit den zugehörigen Höhenklassen ist in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Höhenklasse	$[-17d/16; -15d/16[$	$[-15d/16; -13d/16[$	$[-13d/16; -11d/16[$	$[-11d/16; -9d/16[$	$[-9d/16; -7d/16[$	$[-7d/16; -5d/16[$	$[-5d/16; -3d/16[$	$[-3d/16; -d/16[$
Lokales Muster								
$[-d/16; d/16[$	$[17d/16; 15d/16[$	$[15d/16; 13d/16[$	$[13d/16; 11d/16[$	$[11d/16; 9d/16[$	$[9d/16; 7d/16[$	$[7d/16; 5d/16[$	$[5d/16; 3d/16[$	$[3d/16; -d/16[$

Tabelle 1: Zuordnungstabelle zwischen lokaler Höhenabweichung und lokalem Korrekturätzmuster

[0115] Aus den interferometrischen Höhendaten der Werkstückoberfläche werden nun die Durchschnittshöhen in bündig aneinanderliegenden quadratischen $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ großen Bereichen bestimmt. Nach der Definition der Höhenskala ist diese lokale Durchschnittshöhe gleichbedeutend ist mit der Differenz zwischen dieser lokalen und der globalen Durchschnittshöhe. Die lokale Durchschnittshöhe fällt in eine der 16 äquidistanten Höhenklassen. Die zur Korrektur dieser Differenz notwendige lokale Mikrostruktur wird dann anhand der Tabelle 1 bestimmt.

[0116] Dieses relativ einfache Verfahren mit Hilfe einer festen Zuordnung zwischen Höhenklasse und lokaler Mikrostruktur dient an dieser Stelle nur der Verdeutlichung des Verfahrens. Es ist offensichtlich, dass die Be-

stimmung der Mikrostruktur deutlich verbessert werden kann. Beispielsweise lässt sich eine feinere Höhendiskretisierung in Kombination mit einem größeren Satz an lokalen Muster verwenden.

[0117] Des weiteren ist bei dem beispielhaft beschriebenen Verfahren, das Prozessmodell für den Polierschritt nur dazu verwendet worden die Größe der lokalen Korrekturärmuster festzulegen. Man erkennt in [Fig. 3](#), dass die Größe der lokalen Korrekturmuster von 8 µm in den Strukturbreitenbereich fällt in denen die Dämpfung der Oberflächentopographie sehr stark ist. Die genaue Form der Dämpfungskurve wurde hingegen nicht ausgenutzt, um das Korrekturmuster zu bestimmen. Durch vollständig rechnergestützte Verfahren, die die Optimierung des Korrekturmusters unter Berücksichtigung des gesamten Prozessmodells durchführen, erlauben daher eine noch bessere Anpassung an die vorhandenen Abweichungen.

[0118] Diese Mikrostruktur wird nun auf das ursprüngliche Höhenprofil aufgeprägt. Dadurch entsteht das in [Fig. 7](#) gezeigte Höhenprofil **(30)** (Achsendefinition und Skalierung wie in [Fig. 5](#)). Es ist deutlich zu sehen, dass im Maximum nahezu die gesamte Fläche abgeätzt wird. Hier wird durch die Ätzung das lokale Höhenniveau um 400 nm gesenkt. Außerhalb der lokalen Abweichung wird das Ätzmuster mit 50% Flächenbelegung verwendet, wodurch eine lokale mittlere Höhenabsenkung von nur 200 nm erfolgt. Diese Differenz entspricht genau der ursprünglichen Höhe der Abweichung. Auf den Flanken der Abweichung nimmt die Flächenbelegung der Korrekturmuster zum Zentrum hin zu um das ansteigende Höhenprofil zu kompensieren.

[0119] In [Fig. 8](#) ist das Oberflächenprofil der so modifizierten Oberfläche nach dem hier angenommenen Polierverfahren gezeigt (Achsendefinition und Skalierung wie in [Fig. 5](#)). Die Resttopographie **(33)** beträgt nur mehr etwa 5 nm und ist damit um eine Größenordnung gegenüber dem reinen Polierprozess reduziert worden. Um ohne die Oberflächenstrukturierung eine vergleichbare Planarität zu erreichen müsste die Polierdauer von den hier angenommenen 90 s auf etwa 300 s erhöht werden.

[0120] Bei diesem beispielhaften Verfahren der Festlegung der Mikrostruktur, werden Bereiche in denen die Werkstückoberfläche nur wenig von der Sollgeometrie abweicht mit einem Korrekturmuster von 50% Flächenbelegung geätzt. Dies ist notwendig um auch (in [Fig. 5](#) nicht gezeigte) negative Höhenabweichungen korrigieren zu können. Der Nachteil ist allerdings, dass grundsätzlich die gesamte Werkstückoberfläche geätzt werden muss. Es kann je nach Anforderung und Ausgangstopographie vorteilhaft sein, das Referenzniveau für die Höhenabweichung geeignet zu verschieben und den gesamten vom Ätzprozess ermöglichten Höhenkorrekturbereich nur zur Korrektur der positiven Abweichungen zu verwenden. Alternativ kann auch eine Kombination aus materialabtragendem und -aufbringenden Mikrostrukturierungsverfahren verwendet werden.

[0121] In einem weiteren Anwendungsbeispiel verwenden wir ein Laserablationsverfahren zur Oberflächenstrukturierung.

[0122] Laserablationsverfahren erreichen typischerweise eine minimale Strukturierungsbreite 10–50 µm. Unter Verwendung desselben Verfahren wie im vorangegangenen Beispiel zur Ermittlung des Korrekturärmusters, ergibt sich damit eine maximale Strukturbreite von etwa 40 µm–200 µm. Bei dieser Strukturbreite ist das Elastizitätsmodul unter den oben genannten Prozessbedingungen noch nicht in der hochfrequenten Sättigung.

[0123] Daher wird in diesem Anwendungsbeispiel eine Relativgeschwindigkeit von 2.5–12.5 m/s verwendet, also um einen Faktor 5–25 höher ist als im vorhergehenden Anwendungsbeispiel. Sollten solche Relativgeschwindigkeiten mit einer in [Fig. 2](#) gezeigten rotierenden Poliermaschine nicht erreichbar sein, so können beispielsweise mit Linearpoliermaschinen verwendet werden, bei denen das Poliertuch nur in einer translatorischen Bewegung über das Werkstück geführt wird.

[0124] Die Erhöhung der Relativgeschwindigkeit hat zur Folge, dass die räumliche Frequenz der aufgeprägten Mikrostruktur in eine höhere Frequenz der im Polierkissen erzeugten Deformation umgewandelt wird. Insbesondere gilt der Zusammenhang:

$$\omega_t = v_r \omega_s \tag{F2}$$

wobei ω_t die zeitliche Frequenz der Deformation, ω_s die räumliche Frequenz und v_r die Relativgeschwindigkeit bezeichnet.

[0125] In einem weiteren Anwendungsbeispiel nehmen wir an, dass die erreichbare maximale Relativgeschwindigkeit nur 2 m/s beträgt und das Strukturierungsverfahren eine minimale Auflösung von 20 µm hat. Damit sind die durch die Mikrostrukturierung erzeugten zeitlichen Deformationsfrequenzen nur um einen Faktor

0.4 geringer als im ersten Anwendungsbeispiel.

[0126] Um diesen Faktor auszugleichen, wird in diesem Anwendungsbeispiel die Temperaturabhängigkeit Glasübergangs ausgenutzt.

[0127] Das Temperaturverhalten der Glasübergangsfrequenz folgt bei den meisten Polymeren in guter Näherung einem Arrhenius-Gesetz, das heißt es gilt:

$$\omega_{tr} = \omega_0 \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT}\right) \quad (\text{F3})$$

wobei ΔH eine materialspezifische Aktivierungsenergie, R die Gaskonstante, T die Temperatur und ω_0 eine Materialkonstante ist. Da die Frequenzabhängigkeit des Elastizitätsmodul nur vom Verhältnis ω/ω_{tr} abhängt, ist eine Verschiebung der Glasübergangsfrequenz von $\omega_{tr,1}$ zu $\omega_{tr,2}$ equivalent zu einer Skalierung der Frequenzachse um den Faktor $\omega_{tr,2}/\omega_{tr,1}$.

[0128] Um die Glasübergangsfrequenz ω_{tr} um den Faktor 0.4 gegenüber der Temperatur T_1 aus dem ersten Anwendungsbeispiel zu verringern und damit die gesamte Frequenzabhängigkeit um denselben Faktor zu skalieren, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$0.4 = \frac{\omega_{tr,2}}{\omega_{tr,1}} = \exp\left(\frac{-\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \quad (\text{F4})$$

[0129] Typische Aktivierungsenergien liegen im Bereich von 10–100 kJ/mol und können durch geeignete Herstellungsverfahren des verwendeten Polymers eingestellt werden. Polierprozesse wie der in [Fig. 4](#) charakterisierte laufen bei Raumtemperatur und darüber ab. Durch eine Temperaturverringereung von 10 K bis 30 K kann man daher je nach Aktivierungsenergie Skalierungen der Frequenzabhängigkeit um den hier angenommenen Faktor 0.4 und darüber erreichen.

[0130] Daher wird in diesem Anwendungsbeispiel das Polierkissenträger mit Hilfe einer geeigneten Temperaturregelung auf eine Temperatur abgekühlt, die etwa 10 K bis 30 K unterhalb der Prozesstemperatur aus dem ersten Anwendungsbeispiel liegt. Dies kann beispielsweise durch eine Flüssigkeitskühlung mit einem geeigneten Kühlmittel geschehen, wie sie in [Fig. 10](#) angedeutet ist ermöglicht werden. Ein Kühlmittel strömt über den Zufluss (55), eine Rohrleitung (52) im Inneren des Polierkissenträgers und den Abfluss (56) durch den Polierkissenträger. Auch andere Kühlvorrichtungen etwa mit Peltierelementen sind möglich.

[0131] Damit erreicht man wieder trotz der größeren Strukturbreiten und der geringeren Relativgeschwindigkeit, dass die durch die Mikrostrukturierung induzierten Deformationsfrequenzen in dem Bereich liegen in dem das dynamische Elastizitätsmodul die gewünschten hohen Werte annimmt.

[0132] In einem weiteren Anwendungsbeispiel wird das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von einer Mikrolinsenmatrix verwendet. Im Unterschied zu den bisherigen Anwendungsbeispielen, wird hier die Form der optisch aktiven Oberfläche direkt durch die geeignete Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens erzeugt.

[0133] Jede Einzellinse soll einen Durchmesser im Bereich von 1 mm haben und die Anordnung soll beispielsweise in einer quadratischen Matrix erfolgen, wobei der Abstand der Linsen identisch zu deren Durchmesser sein. Das Linsenprofil soll sphärisch sein mit einem Kugelradius von 500 mm. Dadurch ergibt sich eine Linsenhöhe von 1 μm ergibt.

[0134] Man geht von einem planaren Substrat eines geeigneten Materials (z. B. Quarzglas oder Silizium). In dieses Substrat wird durch photolithographische Mikrostrukturierung eine geeignete Mikrostruktur eingeprägt. Die Berechnung der Mikrostruktur kann auf analoge Weise wie im ersten Anwendungsbeispiel erfolgen, wobei als Sollgeometrie in diesem Beispiel die Oberfläche der Mikrolinsenmatrix eingesetzt wird. Durch den anschließenden Polierschritt wird wiederum die kurzwellige Mikrostruktur eingeebnet, aber die langwelligen Komponenten der aufgetragenen Mikrostruktur bleiben erhalten und bilden die gewünschten sphärischen Mikrolinsen.

[0135] Um kleinere Kugelradien zu erreichen, kann bei dieser Anwendung mit größeren Ätztiefen gearbeitet werden, oder mehrere Prozesszyklen gegebenenfalls mit unterschiedlichen Prozessparametern (insbesondere Polierkissenrauigkeit) verwendet werden. Außerdem kann es zur Berechnung der Mikrostruktur notwendig werden mit Prozessmodellen zu arbeiten, die die höheren Ordnungen des effektiven Federgesetzes berücksichtigen.

sichtigen. Vorteilhaft ist auch die Verwendung einer weichen elastischen Zwischenschicht zwischen dem oberen Polierkissen und dem Polierkissenträger, um die Anpassung der Polierkissenoberfläche an die langreichweitigen Höhenunterschiede zu erlauben.

[0136] In einem weiteren Anwendungsbeispiel verwenden wir das aus dem dynamischen Elastizitätsmodul und der anderen Prozessparameter bestimmten Prozessmodell zur Platzierung von Füllstrukturen zur Verbesserung der Planarität einer dielektrischen Isolationsschicht zwischen zwei Metallebenen eines integrierten Schaltkreises. Wir gehen davon aus, dass das Prozessmodell durch eine einfache Faltung mit der in [Fig. 4](#) gezeigten Faltungsfunktion beschrieben werden kann, das heißt, dass die Höhenunterschiede in der dielektrischen Schicht klein sind gegenüber der Rauigkeit des Polierkissens.

[0137] Zunächst wird aus dem Leiterbahnenlayout der unteren Metallschicht eine Näherung für die Oberflächengeometrie der Werkstückoberfläche nach der Abscheidung der dielektrischen Schicht errechnet. Im einfachsten Fall erfolgt dies dadurch, dass allen Flächen auf denen eine Leiterbahn gezeichnet ist, die Höhe der Metallschichtdicke zugeordnet wird, und alle anderen Bereiche auf die Höhe null gesetzt werden. Vorteilhafter ist es an dieser Stelle genauere Modelle für den Abscheidungsprozess zu verwenden. Dann wird die Oberfläche in kleine Parzellen unterteilt, und in jeder Parzelle die mittlere Höhe errechnet. Die Parzellengröße wird dabei vorteilhafterweise so gewählt, dass sie deutlich kleiner ist, als der typische Radius der Faltungsfunktion des Prozessmodells.

[0138] Mit der so ermittelten Oberflächengeometrie und dem Prozessmodell wird die Oberflächengeometrie nach dem Polierprozess ermittelt. Für den hier angenommenen Fall, erfolgt dies vorteilhafterweise durch Multiplikation der fouriertransformierten Oberflächengeometrie mit der fouriertransformierten Faltungsfunktion des Prozessmodells.

[0139] Um eine möglichst ebene Oberflächengeometrie der Werkstückoberfläche nach dem Polieren zu erreichen sucht man nun eine Höhenkorrekturfunktion, um die die ursprüngliche Oberflächengeometrie korrigiert werden muss. Aufgrund des tiefpassartigen Verhaltens des Prozessmodells, kann man eine solche Höhenkorrekturfunktion dadurch finden, dass man von der ursprünglichen Oberflächengeometrie nur die langwelligen Komponenten bis zu einer bestimmten räumlichen Frequenz berücksichtigt und alle kurzwelligeren Beiträge zu null setzt. Die räumliche Grenzfrequenz ermittelt man aus der Faltungsfunktion in der Art, dass die Fläche unterhalb der Grenzfrequenz einen sehr großen Anteil (z. B. 95%) an dem Gesamtintegral der Faltungsfunktion hat. Die Lage einer entsprechend gewählten Grenzfrequenz ist beispielhaft in [Fig. 4](#) durch **(66)** angedeutet und dort mit ω_{thr} bezeichnet. Durch Rücktransformation der so ermittelten Höhenkorrekturfunktion in den Ortsraum erhält man an jedem Ort die erforderliche Höhe, um welche die mittlere Höhe durch Hinzufügen entsprechender Füllstrukturen verändert werden muss. Da die Höhenkorrekturfunktion nur bis zu der räumlichen Grenzfrequenz ω_{thr} von null verschieden ist, gilt die ermittelte Höhenkorrektur für einen größeren Bereich als die ursprünglich gewählte Parzellengröße. Dadurch wird der Ausdehnung der Faltungsfunktion Rechnung getragen. Je größer dieser Bereich ist, desto größer ist auch die Fläche auf der Füllstrukturen platziert werden können und desto einfacher wird es daher, die Höhenkorrektur zu erreichen.

[0140] Im allgemeinen wird dieses Verfahren sowohl positive als auch negative Höhenkorrekturen ermitteln. Da üblicherweise nur ein Hinzufügen zusätzlicher Füllstrukturen erlaubt ist, ergibt sich dadurch das Problem, dass nur positive Höhenkorrekturen (d. h. eine Anhebung der mittleren lokalen Höhe) möglich sind. Dieses Problem lässt sich dadurch lösen, dass die Höhenkorrekturfunktion durch einen konstanten Offset erweitert wird, der so groß gewählt wird, dass die negativen Höhenkorrekturen in positive Werte umgewandelt werden. Da es sich um einen konstanten, also ortsunabhängigen Offset handelt, verändert er die Oberflächengeometrie nach dem Polieren nicht.

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 10113599 A1 [0034, 0035]
- DE 000010065380 B4 [0098]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines," J. Soc. Glass Technol. 11, 214–256 (1927) [0019]
- J. V. Duffy, G. F. Lee, J. D. Lee, and B. Hartmann, in R. D. Corsaro, and L. H. Sperling, eds., Sound and Vibration Damping with Polymers, (ACS Symposium Series 424), ACS Press, Washington, D. C., 1990, pp. 281–300 [0041]
- C. L. Elmufdi and G. P. Muldowney, "A novel optical technique to measure pad-wafer contact area in chemical mechanical planarization," in Mater. Res. Soc. Symp. Proc., T. Y. Tsui, Y.-C. Joo, L. Michaelson, M. Lane, and A. A. Volinsky, Eds., vol. 914, 2006, pp. paper 0914–F12-06 [0053]
- J. Vlassak, "A model for chemical-mechanical polishing of a material surface based on contact mechanics," Journal of the Mechanics and Physics of solids, vol. 52, pp. 847–873, 2004 [0054]
- „Laser-lithography on non-planar surfaces" by D. Radtke and U. D. Zeitner in Optics Express, Vol. 15, Issue 3, pp. 1167–1174 [0070]
- W. M. Davis and J. P. Szabo, „Group contribution analysis applied to the Havriliak-Negami model for polyurethanes", Corp. And Theor. Polymer Science, 11 (2001), pp 9–15 [0084]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Polieren und zur Formgebung von Werkstückoberflächen (14) umfassend die Schritte:
 - Ermitteln der Maßabweichungen von der gewünschten Geometrie
 - Aufsetzen einer elastischen Oberfläche (19) auf die Werkstückoberfläche (14)
 - Polieren der Werkstückoberfläche (14) durch Erzeugen eines Druckes der elastischen Oberfläche (19) auf die Werkstückoberfläche (14) und Bewegen der elastischen Oberfläche (19) und der Werkstückoberfläche (14) relativ zu einandergekennzeichnet durch die Verwendung eines Materials für die elastische Oberfläche (19), dessen Elastizitätsmodul in einem bestimmten Frequenzbereich eine dynamische Abhängigkeit in der Art aufweist, dass die Kraft, welche notwendig ist, um eine zeitlich variierende Deformation in dem Material zu erzeugen, für rasche Deformationen größer ist als für langsame Deformationen.
2. Polierverfahren nach Anspruch 1, mit dem Schritt Strukturieren der Werkstückoberfläche mittels eines Mikrostrukturierungsverfahrens vor dem Polierschritt, derart, dass langwellige Abweichungen von der Sollgeometrie unter Inkaufnahme einer definierten kurzwelligen Oberflächentopographie reduziert werden.
3. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit dem Schritt Auswählen der Prozessbedingungen, insbesondere der Temperatur und dem Betrag der Relativgeschwindigkeit zwischen der Werkstückoberfläche und der elastischen Oberfläche, derart dass durch die Mikrostrukturierung erzeugte kurzwellige Abweichungen wesentlich schneller eingeebnet werden, als unkorrigierte langwellige Abweichungen.
4. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 wobei die Verfahrensschritte mehrmals hintereinander ausgeführt werden.
5. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das Strukturieren der Werkstückoberfläche mit Hilfe eines photolithographisches Verfahren unter zu Hilfenahme einer Photomaske vorgenommen wird.
6. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das Strukturieren der Werkstückoberfläche mit Hilfe eines photolithographischen Verfahrens unter Verwendung eines computergesteuerten Laserstrahles vorgenommen wird.
7. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das Strukturieren der Werkstückoberfläche mit Hilfe von aus der Drucktechnik bekannten lithographischen Verfahren zum Strukturieren einer Lackmaske und einem anschließenden Ätzschritt zum Abformen der Lackmaskengeometrie in die Werkstückoberfläche vorgenommen wird.
8. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das Strukturieren der Werkstückoberfläche mit Hilfe einer computergesteuerten Laseblationsverfahren vorgenommen wird.
9. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das Strukturieren der Werkstückoberfläche mit Hilfe eines computergesteuerten mechanischen Abtragsverfahren etwa durch mechanisches Ritzen mit geeignet harten Spitzen vorgenommen wird.
10. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostruktur bereits durch eine geeignete Prozessführung formgebender Vorprozesse erzeugt wird.
11. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 dadurch gekennzeichnet, dass die Oberflächenstruktur, die durch eine Platzierung von Bauelementen und die Fertigungsprozesse erzeugt wird, durch eine Platzierung von weiteren nicht-funktionalen Bauelementen so beeinflusst wird, dass langwellige Abweichungen von der Sollgeometrie unter Inkaufnahme von kurzwelligen Abweichungen reduziert werden.
12. Polierverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11 dadurch gekennzeichnet, dass aus den Prozess- und Materialeigenschaften ein Prozessmodell zur Vorhersage der Oberflächengeometrie nach dem Polierverfahren abgeleitet wird.
13. Polierverfahren nach Anspruch 12 dadurch gekennzeichnet, dass die aus dem Prozessmodell vorhergesagte Oberflächengeometrie verwendet wird, den Abbildungsfehler, der durch eine Abweichung von der

Sollgeometrie entsteht, durch eine Formgebung des Werkstückes selbst oder weiterer optischer Elemente zu korrigieren.

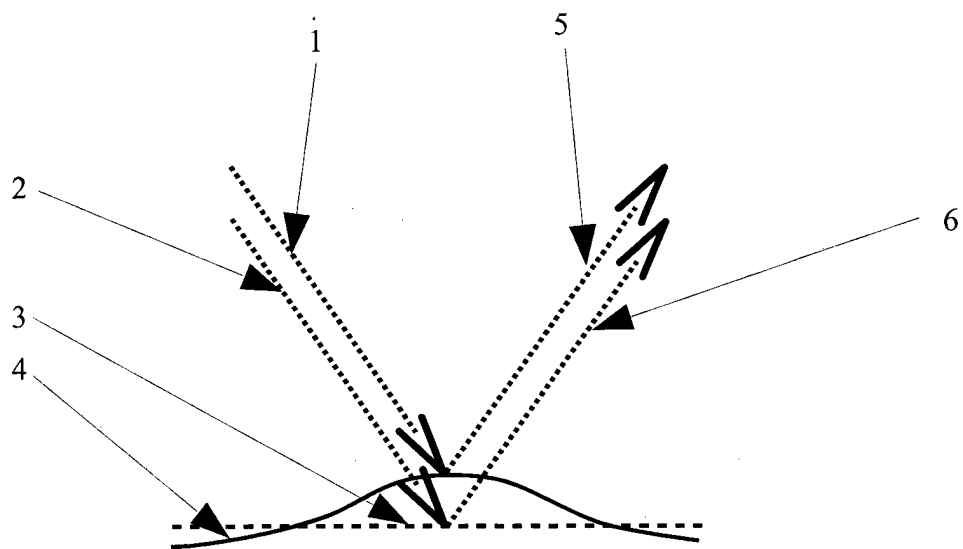
14. Polierverfahren nach Anspruch 12 dadurch gekennzeichnet, dass die aus dem Prozessmodell vorhergesagte Oberflächengeometrie verwendet wird, den Abbildungsfehler, der durch eine Abweichung von der Sollgeometrie entsteht, durch eine Anpassung der Geometrie von Bauteilen zu kompensieren, welche mit einem nachfolgenden Lithographieverfahren strukturiert werden.

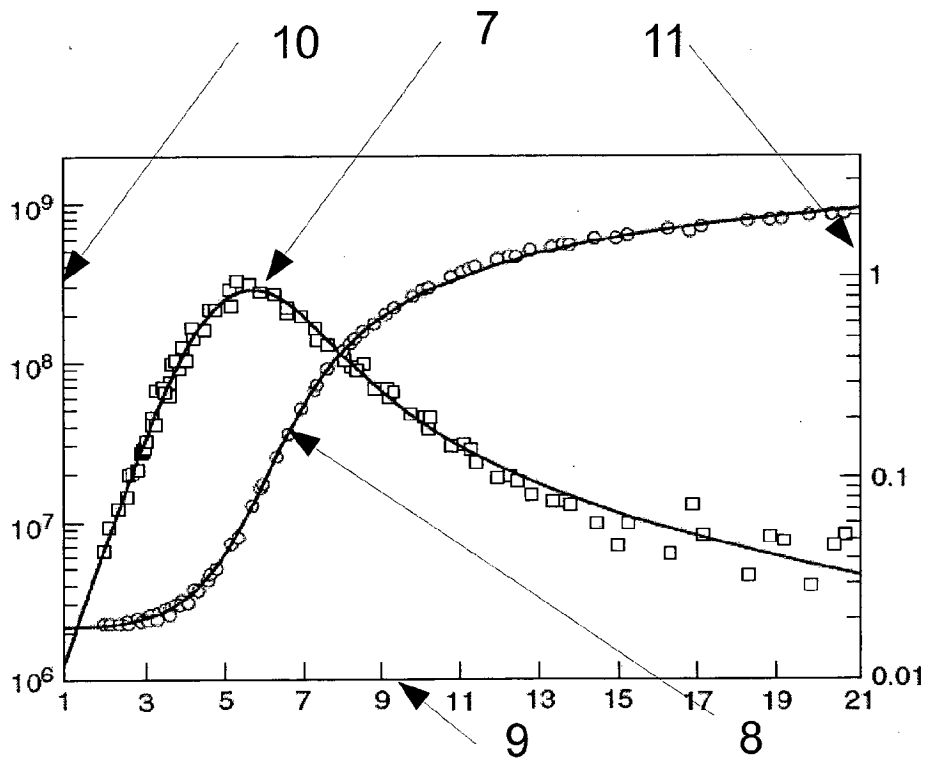
15. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, mit einem Waferträger (**13**) zum Tragen des Werkstückes und einem Polierkissenträger (**15**) zum Tragen der elastischen Oberfläche, wobei das Polieren der Werkstückoberfläche durch Erzeugen eines Druckes der elastischen Oberfläche auf die Werkstückoberfläche und Bewegen der elastischen Oberfläche und der Werkstückoberfläche relativ zu einander durch eine geeignete Mechanik erfolgt und einer Vorrichtung, welche Mikrostrukturen durch eines der in Anspruch 5 bis 8 beschriebenen Verfahren erzeugen kann.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

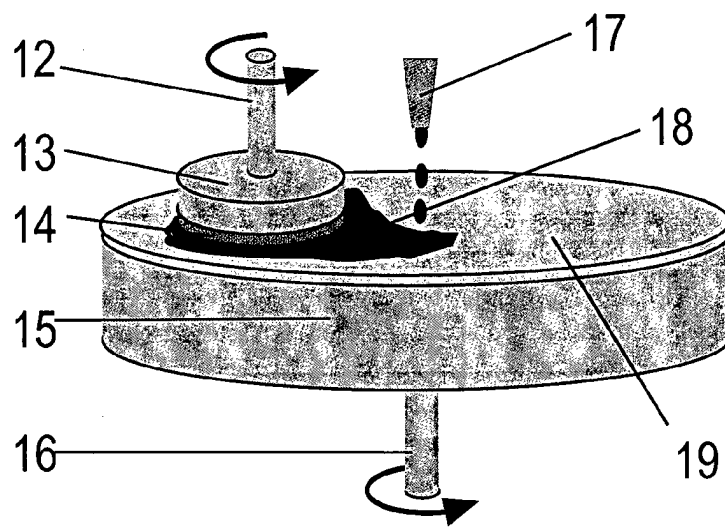
Anhängende Zeichnungen

Figur 1:

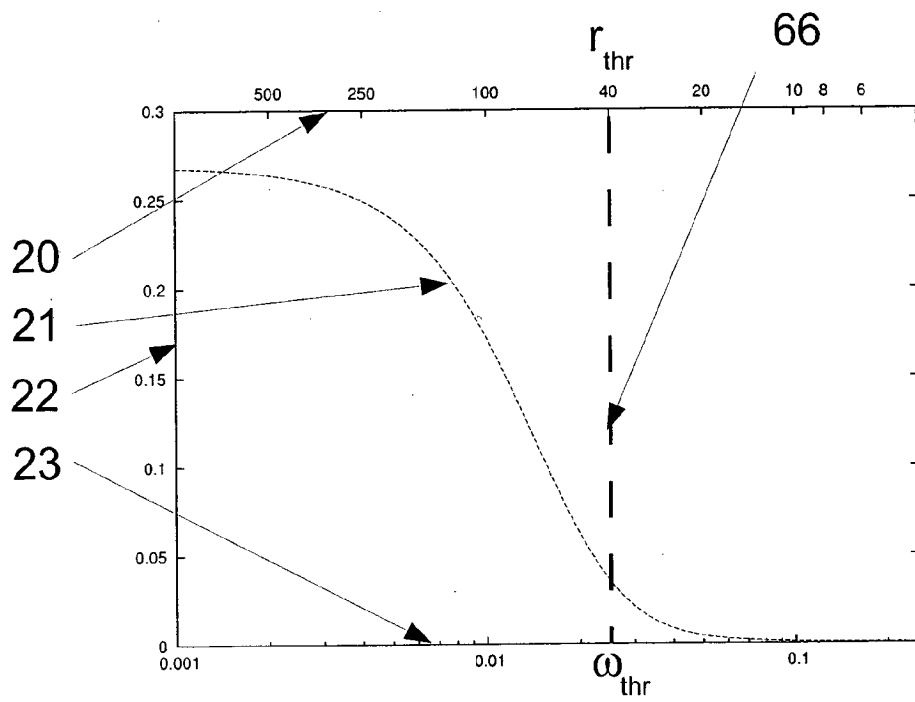




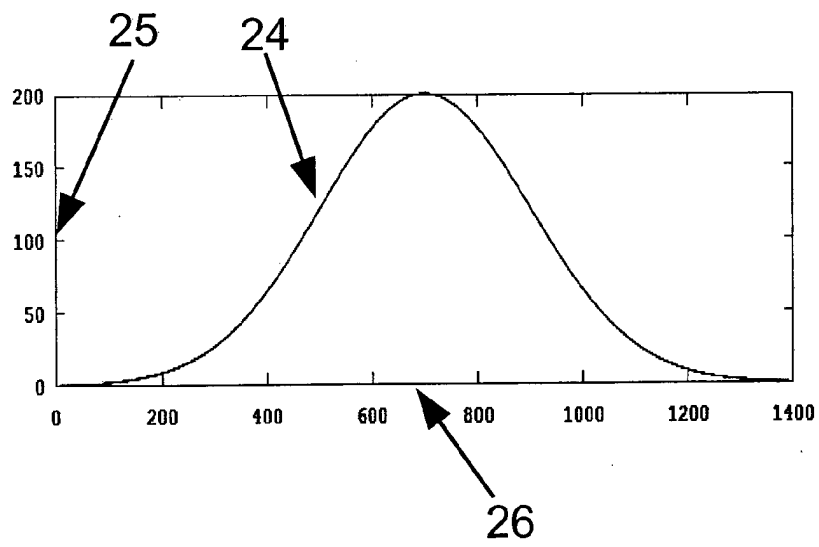
Figur 2:



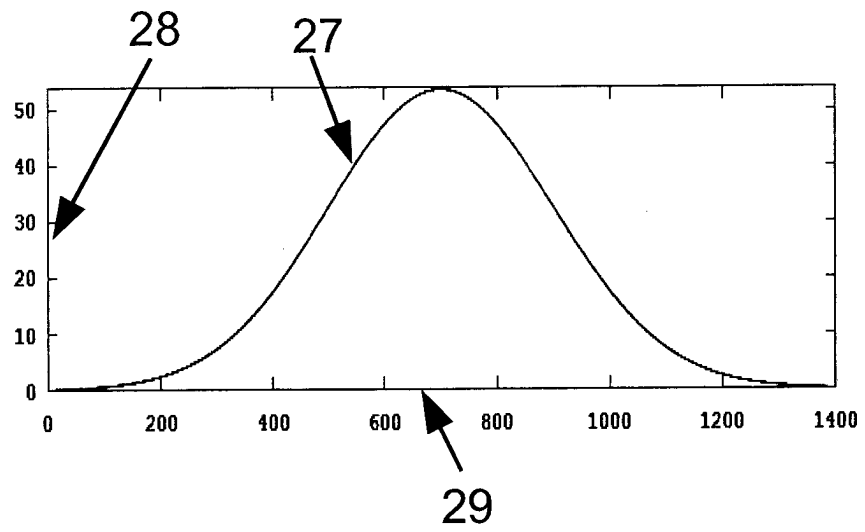
Figur 3:



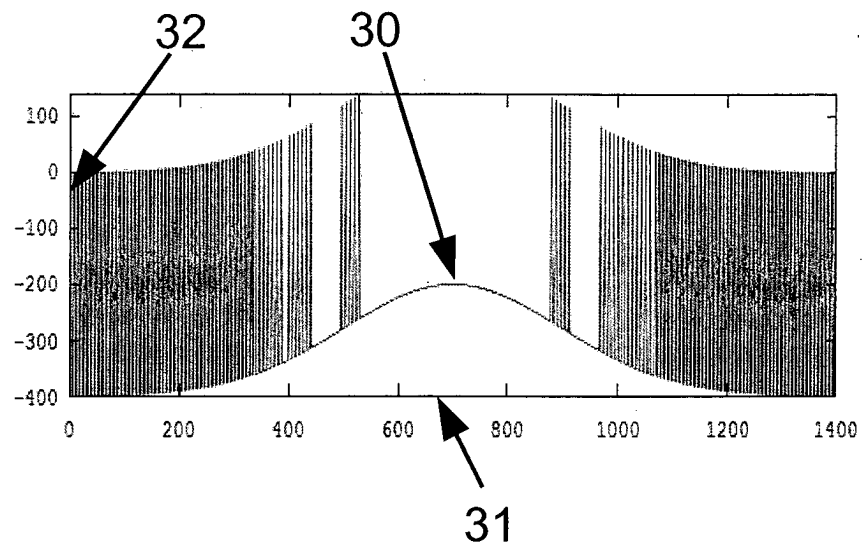
Figur 4:



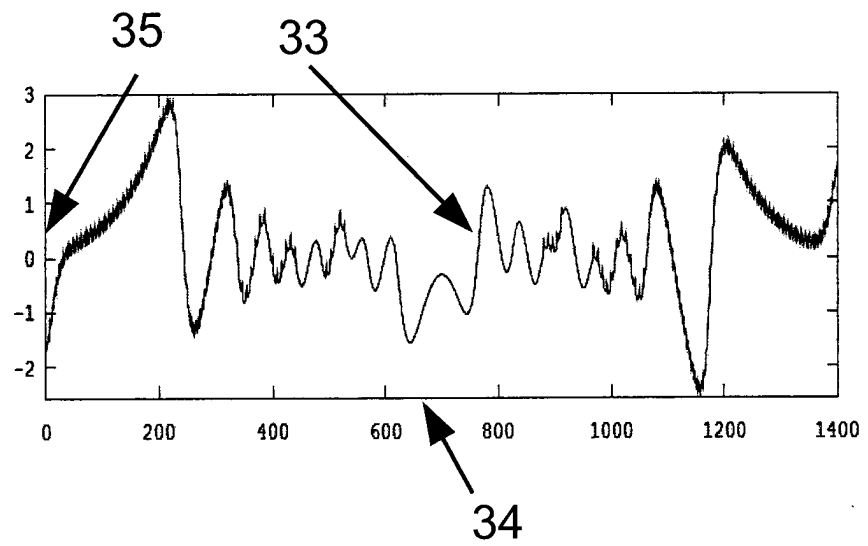
Figur 5:



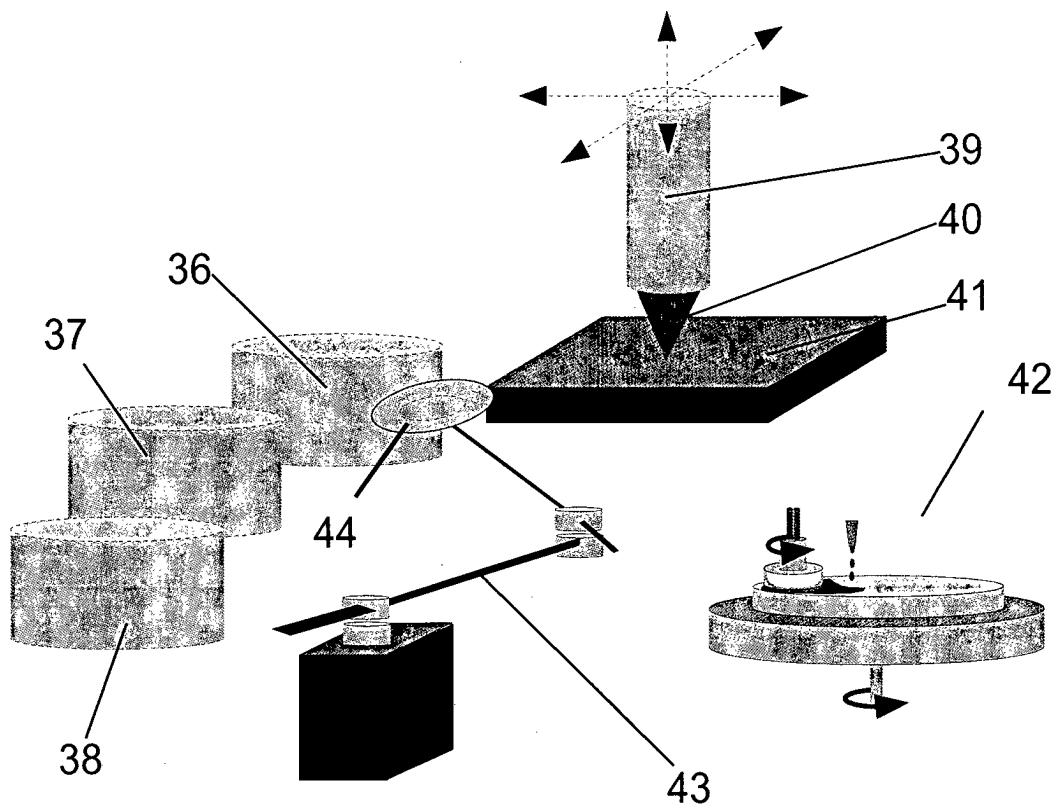
Figur 6:



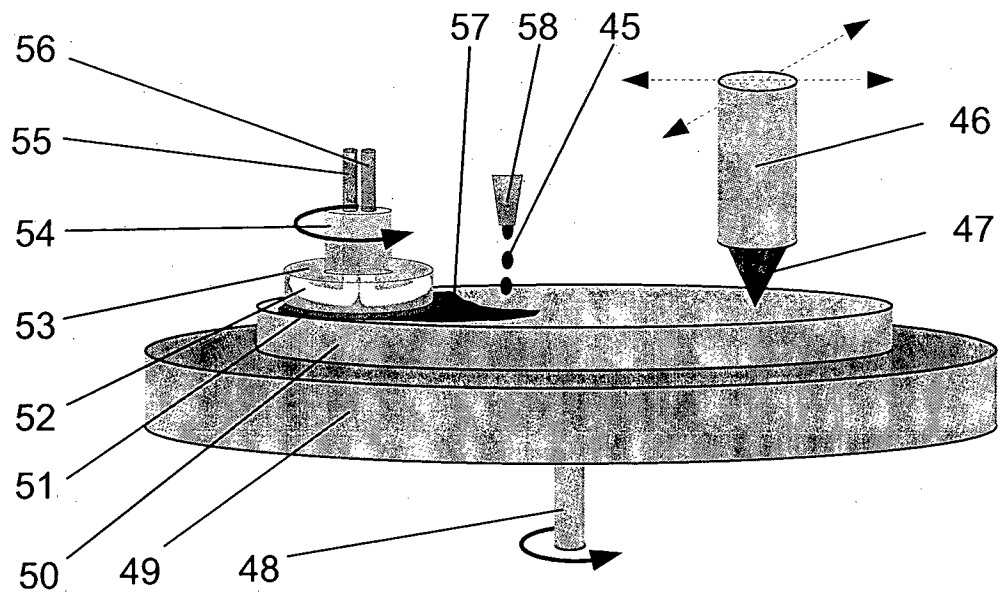
Figur 7:



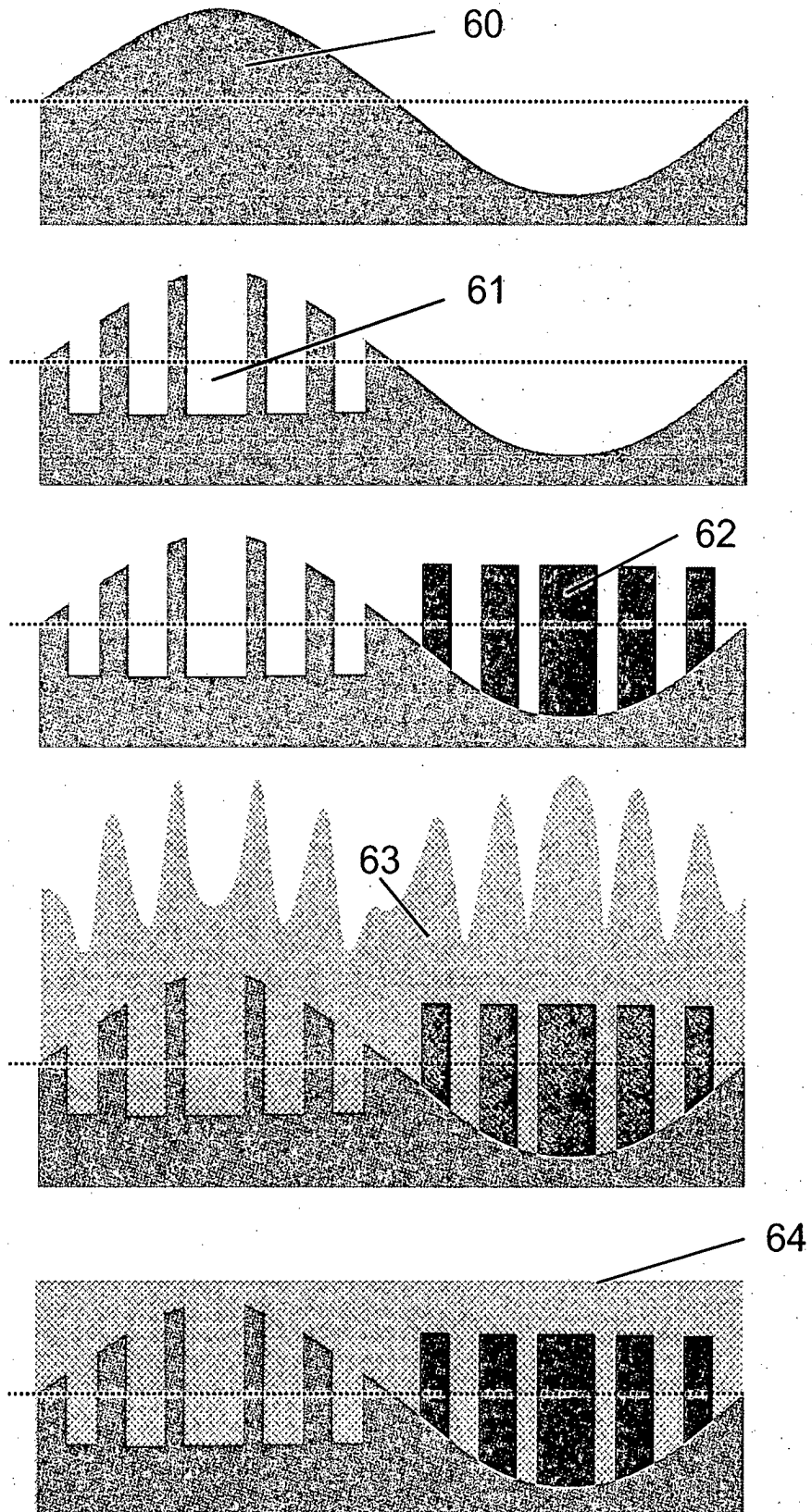
Figur 8:



Figur 9:



Figur 10:



Figur 11: