



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
30.05.2001 Patentblatt 2001/22

(51) Int Cl.7: **G21K 1/06**

(21) Anmeldenummer: **00125565.2**

(22) Anmeldetag: **22.11.2000**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR
 Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:
 • **Kipp, Lutz, Dr.**
24235 Wendtorfer Schleuse (DE)
 • **Seemann, Ralph, Dr.**
20249 Hamburg (DE)

(30) Priorität: **25.11.1999 DE 19956782**

(74) Vertreter: **Seemann, Ralph, Dr. Dipl.-Phys.**
Patentanwälte,
Niedmers & Seemann,
Van-der-Smissen-Strasse 3
22767 Hamburg (DE)

(71) Anmelder:
 • **Kipp, Lutz, Dr.**
24235 Wendtorfer Schleuse (DE)
 • **Seemann, Ralph, Dr.**
20249 Hamburg (DE)

(54) **Optisches Fokussierelement und Messsystem**

(57) Die Erfindung betrifft ein optisches Element zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen (20, 21) oder Strahlen von Elementarteilchen, insbesondere von Röntgenstrahlen, umfassend eine Fresnelsche Zonenplatte (30) mit Ringzonen, die durchlässig für die Strahlen (20, 21) sind und Ringzonen, die für die Strahlen (20, 21) undurchlässig sind und ferner ein Meßsystem, insbesondere zum Vermessen von inneren Bereichen dreidimensionaler Proben mit hoher Ortsauflösung und einer Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften eines Bereichs einer Probe, insbesondere eines Innenbereichs einer Probe. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß das optische Element dadurch weitergebildet ist, daß die für die Strahlen (20, 21) durchlässigen Ringzonen der Fresnelschen Zonenplatte (30) teilweise für die Strahlen (20, 21) undurchlässig sind. Die Erfindung zeichnet sich ferner dadurch aus, daß das Meßsystem und die Apparatur zur Veränderung der Eigenschaften eines Bereichs einer Probe wenigstens ein entsprechendes optisches Element umfassen.

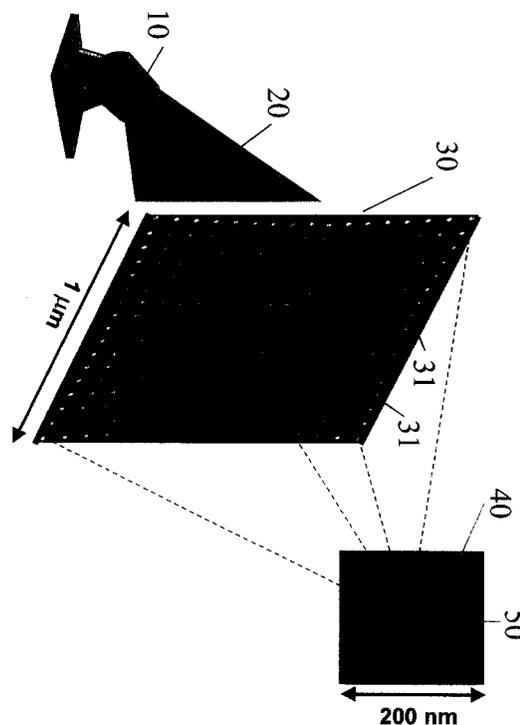


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein optisches Element zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen oder Strahlen von Elementarteilchen, insbesondere von Röntgenstrahlen, umfassend eine Fresnelsche Zonenplatte mit Ringzonen, die durchlässig für die Strahlen sind und Ringzonen, die für die Strahlen undurchlässig sind, ein Meßsystem, insbesondere zum Vermessen von inneren Bereichen dreidimensionaler Proben mit hoher Ortsauflösung und eine Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften eines Bereichs einer Probe, insbesondere eines inneren Bereichs einer Probe.

[0002] Optische Elemente zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen oder Strahlen von Elementarteilchen sind bekannt. Elektromagnetische Strahlen im sichtbaren Bereich werden üblicherweise durch beispielsweise Glaslinsen fokussiert. Strahlen in einem Wellenlängenbereich des VUV (Vakuum-Ultraviolett) oder Röntgenstrahlen lassen sich schon deutlich schwieriger fokussieren. Aus "Physikalische Blätter" 55 (1999) Nr. 5, Seite 17 ist es bekannt, Röntgenstrahlen durch Verwendung einer großen Anzahl von Linsen, wie beispielsweise 30 bis 50 Stück, die hintereinander angeordnet sind, zu fokussieren.

[0003] Ferner ist es bekannt, Licht mittels Fresnelschen Zonenplatten zu fokussieren. Fresnelsche Zonenplatten nutzen die Welleneigenschaften von Licht aus und insbesondere die Verbindung des Huygenschen Prinzips und des Interferenzprinzips (Huygens-Fresnelsches Prinzip) das ein 1818 entwickeltes Hilfsmittel zur Bestimmung und Erklärung von Beugungerscheinungen besonders hinter kreisförmigen Blenden oder Schirmen ist.

[0004] Hierbei wird davon ausgegangen, daß eine punktförmige, monochromatische Lichtquelle eine kreisförmige Wellenfront erzeugt, die an den ringförmigen Zonen A_1, A_2, A_3, \dots Elementarwellen auslöst, die in einem gewählten Aufpunkt miteinander interferieren. Der Aufpunkt wird zum Fokus, wenn die Abstände der Zonen A_1, A_2, A_3, \dots so gewählt sind, daß Sie vom Aufpunkt um $1/2 \lambda, \lambda, 3/2 \lambda, 2 \lambda, \dots$ weiter entfernt sind als das Zentrum der Zonenplatte. ist hierbei die Wellenlänge des Lichtes. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Zonen abwechselnd durchlässig und undurchlässig sind. Die Intensität im Fokus bzw. im Aufpunkt erhält man durch Summation über die Beiträge aller Elementarwellen aus den Zonen. Bei ungestörter Wellenausbreitung trägt nur das Zentrum der inneren Zone mit dem halben Radius A_1 zur Erregung im Aufpunkt bei, alle übrigen Beiträge löschen sich durch Interferenz aus. Wird im Abstand b von dem Aufpunkt, der dem Abstand der Lochblende zum Aufpunkt entspricht, eine Lochblende aufgestellt, die den Bereich der inneren Zone freiläßt, so tragen alle von dieser Zone ausgehenden Elementarwellen zur Erregung in dem Aufpunkt bei, so daß die Helligkeit größer als bei fehlender Blende wird.

[0005] Wird ein Schirm in die Ebene aufgestellt, in der der Aufpunkt liegt und zwar parallel zur Ebene der Zonenplatte, werden über dem Schirm verteilt unterschiedlich große Intensitäten sichtbar, die aufgrund der Interferenz der Zonenplatte hervorgerufen werden. Auch in dem Raum zwischen dem Schirm bzw. dem Aufpunkt und der Zonenplatte existieren Intensitätsminima und Intensitätsmaxima. Je mehr Zonen Verwendung finden, um so enger sind die Maxima. Es bleiben allerdings immer auch Maxima, also Intensität von Licht auf dem Weg zum Schirm meßbar.

[0006] Die Verwendung der bekannten optischen Elemente zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen oder von Strahlen von Elementarteilchen, (wobei für die Strahlen von Elementarteilchen die Welleneigenschaft der Elementarteilchen ausgenutzt wird), haben den Nachteil, daß im Falle der üblichen Fresnelschen Zonenplatte viele Intensitätsmaxima durch Interferenzen erzeugt werden, so daß eine Verwendung derartiger Zonenplatten für höchstauflösende Meßsysteme oder höchstauflösende Apparaturen zur Veränderung von Eigenschaften von Bereichen von Proben wenig geeignet sind. Insbesondere ist es auch aufgrund der in Ausbreitungsrichtung vorherrschenden Intensitätsmaxima nicht verläßlich möglich, Bereiche innerhalb einer Probe zu messen oder zu verändern, ohne die Bereiche, die davor liegen, also zur Oberfläche hin, mit entsprechend hoher Intensität mit zu vermessen oder zu verändern. Schließlich sind derartige Zonenplatten bei hoch intensiver Strahlung mit hoher Leistung insbesondere im VUV oder Röntgenbereich nur unzureichend verwendbar, da beispielsweise bei Verwendung eines Metalls als Zonenplattenmaterial die durchlässigen Bereiche durch Aussparung des Metalls gegeben wären und aufgrund dessen schmale Stege für eine stabile Struktur zwischen den undurchlässigen Zonenbereichen verwendet werden müßten, die selbst zu Störungen bzw. Interferenzen führen und die dazu führen, daß die Wärmeableitung äußerst gering wäre, so daß bei hoher Leistungsaufnahme die verwendeten Zonenplatten zerstört werden würden.

[0007] Auch die aus den physikalischen Blättern 55 (1999, Nr. 5, Seite 17) bekannten optischen Elemente zur Fokussierung von Röntgenstrahlen sind für höchstauflösende Meßsysteme, insbesondere im inneren von Körpern, wenig geeignet, da diese nur wenig Leistung aufnehmen können und keine durch Interferenzen bedingte erhöhte Intensität im dreidimensionalen Raum gegeben ist.

[0008] Es ist Aufgabe der Erfindung, ein optisches Element zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen oder Strahlen von Elementarteilchen, insbesondere von Röntgenstrahlen anzugeben, mit dem insbesondere eine Realisierung eines räumlich hochauflösenden Meßsystems und einer räumlich hochauflösenden Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften eines Bereichs einer Probe möglich ist, wobei insbeson-

dere der Fokus vergleichsweise eine geringe Ausdehnung haben soll und zwar im Dreidimensionalen und insbesondere die Intensität der Strahlen im Fokus wesentlich höher ist, als im Bereich außerhalb des Fokus. Hierbei soll es insbesondere auch möglich sein, dem optischen Element Strahlen mit hoher Leistung auszusetzen, ohne daß das optische Element hierdurch beschädigt wird.

[0009] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein optisches Element zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen oder Strahlen von Elementarteilchen, insbesondere von Röntgenstrahlen, umfassend eine Fresnelsche Zonenplatte mit Ringzonen, die durchlässig für die Strahlen sind und Ringzonen, die für die Strahlen undurchlässig sind, wobei die für die Strahlen durchlässigen Ringzonen der Fresnelschen Zonenplatte teilweise, insbesondere Bereichsweise, für die Strahlen undurchlässig sind.

[0010] Durch dieses erfindungsgemäße optische Element wird ausgenutzt, daß die bei einer Fresnelschen Zonenplatte üblichen relativ intensiven Nebenmaxima durch weitere Beugungserscheinungen im wesentlichen auslöschar sind. Vorzugsweise sind die zu verwendenden Strahlen kohärent und insbesondere monochromatisch. Zur Fokussierung von Elementarteilchen wird deren Wellennatur ausgenutzt, so daß im Rahmen dieser Erfindung bei dem Begriff Strahlen nicht nur von elektromagnetischen Strahlen auszugehen ist, sondern auch von Strahlen von Elementarteilchen.

[0011] Vorzugsweise ist das erfindungsgemäße optische Element dadurch weitergebildet, daß die für die Strahlen durchlässigen Bereiche derart angeordnet sind, daß eine Verringerung der Intensität von Beugungsnebenmaxima erreicht wird. Durch diese vorzugsweise Ausgestaltung der Erfindung wird es möglich, einen sehr hohen Unterschied zwischen der Intensität des Hauptmaximums zur Intensität der Beugungsnebenmaxima aufgrund der Beugung an der Frennelinse zu erreichen. Wenn vorzugsweise die Erfindung derart weitergebildet ist, daß im wesentlichen die Intensität der Beugungsnebenmaxima unterdrückt wird, kann das optische Element in sehr vielen technischen Anwendungen, bei denen entsprechende Intensitätsunterschiede notwendig sind, Verwendung finden.

[0012] Vorzugsweise ist das erfindungsgemäße optische Element dadurch weitergebildet, daß die für die Strahlen durchlässigen Ringzonen bis auf jeweils wenigstens einen Bereich undurchlässig sind, wobei die maximale Ausdehnung des jeweiligen Bereichs durch

$$(2)^{\frac{1}{2}}((nb\lambda)^{\frac{1}{2}} - ((n-1)b\lambda)^{\frac{1}{2}})$$

gegeben ist, wobei n eine ganze Zahl, b eine Brennweite und λ die Wellenlänge der Strahlen ist. Die Halbwertsbreite des Fokus kann bevorzugterweise für große n dadurch verbessert werden, daß die oben genannte Formel durch einen weiteren Term erweitert wird, der sich

daraus ergibt, daß die Radien der Zentren der durchlässigen Ringzonen herkömmlicher Zonenplatten durch $r = (2nb\lambda + n^2\lambda^2)^{\frac{1}{2}}$ bei genauerer Berechnung gegeben ist. Die durchlässigen Bereiche können beispielsweise 5 Löcher sein oder Aussparungen, die beispielsweise viereckig ausgebildet sind. Durch die angegebene maximale Ausdehnung können insbesondere quasiquadratische Bereiche ausgebildet sein, deren Kantenlänge der Breite einer Ringzone entspricht. Durch diese 10 Maßnahme ist es möglich, relativ viel Intensität durch die Zonenplatte hindurch gelangen zu lassen. Die Wellenlänge der Strahlen kann zwischen Wellenlängen von Mikrowellen und harter Röntgenstrahlung liegen. Die Wellenlänge von Elementarteilchen ergibt sich nach der 15 Beziehung von de Broglie mit $\lambda = h/p$ (h = Planksches Wirkungsquantum, $p = E/c$, Impuls, wobei E die Energie ist und c die Lichtwellenlänge im Vakuum). Vorzugsweise ist der durchlässige Bereich jeweils ein Kreis, dessen Durchmesser der radialen Ausdehnung der jeweiligen 20 durchlässigen Ringzonen angepaßt ist. Weiter vorzugsweise ist der durchlässige Bereich jeweils ein Kreis, dessen Durchmesser kleiner als 100 nm ist. Wenn vorzugsweise der Durchmesser zwischen 20 nm und 40 nm liegt und insbesondere 30 nm ist, ist es möglich, bei 25 einer Energie der Strahlen von 200 eV einen Fokus mit einer räumlichen Ausdehnung von 3 nm Halbwertsbreite (FWHM) zu erzielen. Es ist ferner vorzugsweise möglich, Foki zu erzeugen, die für die jeweiligen Wellenlängen im Bereich der Beugungsgrenze liegen.

[0013] Vorzugsweise umfaßt das optische Element ein für die Strahlen im wesentlichen durchlässiges Trägermaterial und eine für die Strahlen undurchlässige Beschichtung. Derartige optische Elemente können durch Lithographie-Verfahren und insbesondere durch 35 Elektronenstrahl-Lithographie erzeugt werden. Ferner vorzugsweise ist das Trägermaterial Silizium und die Beschichtung umfaßt ein Metall. Derartige optische Elemente eignen sich bevorzugt für Röntgenstrahlen. Bevorzugterweise ist das Silizium ein Polysilizium.

[0014] Ein besonders gut wärmeabführendes optisches Element ist gegeben, wenn das optische Element vorzugsweise im wesentlichen aus einem für die Strahlen undurchlässigen Material besteht und die für die Strahlen durchlässigen Bereiche durch eine Aussparung des Materials gegeben sind. Hierbei sind insbesondere Materialien bevorzugt, die gute Wärmeleiter sind. Es ist heutzutage ohne weiteres möglich beispielsweise Löcher herzustellen, die im Bereich von einigen 40 10 nm liegen. Siehe hierzu insbesondere die Veröffentlichung von Roli Lüthi et al. in "Appl. Phys. Lett." 75, 30.08.1999, S. 1314 mit dem Titel "Parallel nanodevice application using a combination of shadow-mask and scanning probe methods".

[0015] Wenn vorzugsweise das optische Element 45 drehbar gelagert ist, ist es möglich dieses mit höherer Intensität bzw. Leistung zu bestrahlen. Hierzu wird vorzugsweise eine Drehung um die zentrale Achse der Fresnelinse oder Zonenplatte vorgenommen. Die

Strahlen werden dann azentrisch auf die Fresnelinse oder Zonenplatte gebracht. Hierbei ergibt sich dann ein zentrischer Fokus, bestehend aus einem Beugungshauptmaximum und im wesentlichen unterdrückt den Beugungsnebenmaxima, wobei das Hauptmaximum in seiner Position fixiert bleibt.

[0016] Vorzugsweise ist die zentrale Zone der Zonenplatte undurchlässig. Ferner vorzugsweise ist je Zone ein (1) durchlässiger Bereich vorgesehen, wobei maximal ein durchlässiger Bereich jeder radialen Strecke vom Zentrum der Zonenplatte zum Rand hin angeordnet ist. Durch diese vorzugsweise Ausgestaltung ist es möglich, die Nebenmaxima deutlich zu minimieren. Die Erzeugung des Musters des durchlässigen Bereichs geschieht strukturiert oder durch Zufallszahlen generiert, wie unter

[0017] Bezugnahme auf die Zeichnungen näher beschrieben wird. Wenn vorzugsweise die Abstände jeweils zweier durchlässiger Bereiche ungleich zu sämtlichen anderen Abständen zwischen weiteren durchlässigen Bereichen ist, mit anderen Worten, wenn kein Abstand eines durchlässigen Bereiches zu einem anderen durchlässigen Bereich gleich groß ist, können bevorzugterweise die Intensitäten in den Nebenmaxima weiter minimiert werden.

[0018] Vorzugsweise umfaßt ein Meßsystem, insbesondere zum Vermessen von inneren Bereichen dreidimensionaler Proben mit hoher Ortsauflösung, wenigstens ein optisches Element der vorbezeichneten Art, eine Strahlenquelle und wenigstens einen Detektor. Durch die Verwendung der oben beschriebenen optischen Elemente ist eine Ortsauflösung des Meßsystems bis hin zur Beugungsgrenze möglich. Durch derartige Meßsysteme ist es insbesondere möglich, auch im inneren von Proben Messungen durchzuführen, die bei herkömmlichen Meßverfahren nicht ohne weiteres und ohne Zerstörung der Probe zu vermessen wären. Dieses liegt darin begründet, daß die Intensität des Fokus des optischen Elements im Vergleich zur restlichen Intensität, die nicht im Fokus angeordnet ist, deutlich höher ist, als bei anderen herkömmlichen optischen Elementen. Vorzugsweise ist die Probe zwischen einem optischen Element und dem Detektor angeordnet, wodurch insbesondere Absorptionsmessungen oder Fluoreszenzmessungen möglich sind. Weiter vorzugsweise ist in dem Meßsystem eine Reihenfolge - optisches Element - Probe - optisches Element - Detektor vorgesehen. Hierbei ist insbesondere die Strahlenquelle vorzugsweise kohärent. Durch Verwendung zweier optischer obengenannter optischer Elemente ist es möglich, den Untergrund der Messungen zu verringern. Hierbei ist es bevorzugt, daß die optischen Elemente die gleiche Brennweite aufweisen und von den weiteren, für die optischen Elemente spezifischen Merkmale, wenigstens eines sich unterscheidet.

[0019] Mit dem erfindungsgemäßen bevorzugten Meßsystem ist es möglich, eine Vielzahl von Meßmethoden durchzuführen. Beispielsweise ist es möglich,

durch Absorptionsmessungen ein dreidimensionales Abbild eines Körpers zu erzeugen. Bei bevorzugter Verwendung von Röntgenstrahlen ergibt dieses ein dreidimensionales Röntgenbild des zu vermessenden Körpers. Bei Fluoreszenzmessungen kann der Detektor aus der Sicht des optischen Elements hinter dem zu vermessenden Körper plaziert werden oder auch davor, so daß der Körper nicht zwischen den Geräten zu positionieren ist, sondern das gesamte Meßsystem in einem handlichen Gerät untergebracht werden kann. Da auf dem Weg in den Körper hinein die Strahlen zum Teil absorbiert werden, ist es für eine noch verlässlichere Messung vorzugsweise möglich, auch den Bereich bis zu dem zu vermessenden Bereich zu vermessen. um etwas über die Absorption im Bereich vor dem zu vermessenden Bereich zu lernen.

[0020] Bei Verwendung von Strahlen, die von dem zu vermessenden Körper oder der zu vermessenden Probe stark absorbiert werden bzw. bei Verwendung entsprechender Winkel zwischen den einfallenden fokussierten Strahlen und der Oberfläche der Proben ist es möglich, Messungen mit hoher Ortsauflösung auf der Oberfläche durchzuführen. Insbesondere ist es möglich, die Verteilung von verschiedenem Material, also insbesondere die Dichte und die chemische Zusammensetzung bzw. die chemischen Bindungen zweidimensional oder dreidimensional zu vermessen. Es ist ferner mit dem erfindungsgemäßen vorzugsweisen Meßsystem und den oder einem optischen Element möglich, eine Holographie des Inneren eines Körpers durchzuführen. Eine komplizierte Bildverarbeitung, wie beispielsweise bei der Tomographie ist bei dem bevorzugten Meßsystem nicht nötig, da direkt dreidimensional der Körper vermessen wird.

[0021] Das bevorzugte Meßsystem ist insbesondere auch geeignet für einen sogenannten freien Elektronenlaser (im folgenden FEL genannt), mittels dem bei einer Ortsauflösung von bis zu ungefähr 10 nm und einer Energieauflösung von bis zu ungefähr 1 meV mit hoher Intensität dreidimensionale Messungen durchgeführt werden können.

[0022] Vorzugsweise umfaßt eine Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften eines Bereichs einer Probe, insbesondere eines Innenbereichs einer Probe, eine kohärente intensive Strahlenquelle und ein optisches Element der vorbezeichneten Art.

[0023] Vorzugsweise ist in dem zu verändernden Bereich der Probe die Probe schmelzbar, chemisch veränderbar oder dort angeordnete lebende Zellen sind zerstörbar.

[0024] Vorzugsweise ist die Probe ein Speicherelement und insbesondere ein optisches Speicherelement. Hierbei kann es sich um zweidimensionale optische Speicherelemente aber auch um dreidimensionale optische Speicherelemente handeln. Durch den sehr kleinen Fokusbereich aufgrund der Abbildung von im wesentlichen des Hauptmaximums und der im wesentli-

chen unterdrückten Intensität der Nebenmaxima und zwar nicht nur in einer einzigen Ebene sondern auch in drei Dimensionen gedacht, ergibt sich ein dreidimensional sehr enger Fokus, der mit herkömmlichen Fokussierelementen nicht erreichbar ist. Hierdurch können insbesondere vorzugsweise dreidimensionale Speicher abgetastet werden oder beschrieben werden. Hierbei sei insbesondere an DVD-Roms bzw. wiederbeschreibbare DVD's gedacht oder an Speicherelemente, bei denen das Speichermaterial in vielen Lagen übereinandergeordnet ist, wobei der Abstand kleiner ist als bei den sogenannten Tesafilm-Speichern.

[0025] Vorzugsweise ist eine optische Speichereinrichtung mit wenigstens einer optischen Strahlenquelle, wenigstens einem erfindungsgemäßen optischen Element und einem optischen Speicherelement sowie einem Strahlendetektor versehen. Wenn vorzugsweise mittels der optischen Speichereinrichtung der Speicherinhalt des Speicherelements lesbar und/oder beschreibbar ist. Können Speicherelemente, die eine sehr hohe Speicherdichte oder sogar dreidimensional Daten speichern können, Verwendung finden. Der Speicherinhalt ist aufgrund der wenigsten einen Strahlenquelle und des wenigsten einen optischen Elements auf den wenigsten einen Strahlendetektor abbildbar. Hierbei wird entweder der zu der Umgebung unterschiedliche Absorptionseffizient der fokussierten Strahlung an dem Speicherinhalt verwendet oder das unterschiedliche Reflektionsvermögen.

[0026] Vorzugsweise wird wenigstens ein optisches Element der vorbezeichneten Art zur Materialbearbeitung insbesondere im Inneren von Körpern verwendet. Ferner vorzugsweise wird wenigstens ein optisches Element der vorgenannten Art zur Veränderung oder Zerstörung von lebenden Zellen und/oder Geweben von Lebewesen und/oder von Datenträgermaterial verwendet. Insbesondere ist es möglich, mit derartigen optischen Elementen oder Apparaturen der vorbezeichneten Art Krebszellen im Körper insbesondere von Menschen zu zerstören oder insoweit zu verändern, daß das Wachstum der Zellen gestoppt wird.

[0027] Vorzugsweise wird wenigstens ein erfindungsgemäßes optisches Element in einer optischen Speichereinrichtung verwendet.

[0028] Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung exemplarisch beschrieben, auf die im übrigen bezüglich der Offenbarung aller im Text nicht näher erläuterten erfindungsgemäßen Einzelheiten ausdrücklich verwiesen wird. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Meßsystems oder einer erfindungsgemäßen Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften ei-

nes Bereichs einer Probe,

Fig. 2 eine weitere schematische Darstellung eines weiteren Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Meßsystems,

Fig. 3a ein zu vermessendes Objekt, b) Bild des zu vermessenden Objekts aus a), erzeugt durch ein optisches Element mit geordneten durchlässigen Bereichen, c) ein Bild erzeugt mit einem optischen Element mit ungeordneten bzw. nach einer gewissen Regel statistisch erzeugten durchlässigen Bereichen,

Fig. 4a ein optisches Element in einer zweiten Ausführungsform,

Fig. 4b und c Intensitätsverteilungen, die mit einem optischen Element gemäß Fig. 4 a gerechnet sind,

Fig. 5 oben: Gerechnetes Bild der Intensitätsverteilung, das aufgrund Interferenzen durch ein geordnetes Muster von durchlässigen Bereichen des optischen Elements hervorgerufen wird, unten: das Bild wie oben nur mit einer verstärkten Intensitätsverteilung (Faktor 10),

Fig. 6 entspricht Fig. 5 nur gerechnet mit ungeordneten bzw. statistisch verteilten durchlässigen Bereichen des optischen Elements, und

Fig. 7 die Lochblende von 4 a, bei der durch die Linie A-A eine Unterteilung dargestellt wird.

[0029] In den folgenden Figuren sind jeweils gleiche oder entsprechende Teile mit denselben Bezugszeichen bezeichnet, so daß auf eine erneute Vorstellung verzichtet wird und lediglich die Abweichungen der in diesen Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele gegenüber dem ersten Ausführungsbeispiel erläutert werden.

[0030] Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung in schematischer Darstellung. Eine Lichtquelle, die schematisch als Lampe 10 dargestellt ist, sendet Licht 20, das in einem gewissen Grad kohärent und bevorzugterweise in hohem Grad kohärent ist und auf eine erfindungsgemäße Zonenplatte 30 fällt, die eine Größe von $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ hat. Die Zonenplatte 30 weist Löcher 31 auf, deren Anordnung unten beschrieben wird. Aufgrund der speziellen Anordnung

der Löcher auf der Zonenplatte kommt es zu einer Fokussierung des Lichts 20 auf einen Schirm 40 in einen Fokus 50. Der Schirm 40 hat eine Größe von 200 nm × 200 nm. Die Anordnung der Löcher 31 auf der Zonenplatte 30 wird wie folgt ausgeführt.

[0031] Es wird sich ein quadratisches Gitter gedacht, daß auf eine übliche Fresnelsche Zonenplatte, die für die vorgegebenen beispielsweise elektromagnetischen Strahlen beispielsweise einer Energie von 200 eV angepaßt ist, gelegt wird. Die Kreuzpunkte des quadratischen Gitters, d.h. die Kreuzpunkte der Linien des gedachten Gitters, sind die Ausgangspunkte für die Herstellung der Löcher 31, die beispielsweise einen Durchmesser von 30 nm aufweisen. Die Löcher 31 werden nun ausgehend von den Kreuzpunkten des quadratischen Gitters an der zunächst an sich bei herkömmlichen Zonenplatten für die Strahlen durchlässigen Zone in der dazu am nächsten liegenden Stelle angeordnet.

[0032] Bei diesem Ausführungsbeispiel sind allerdings die an sich durchlässigen Bereiche der herkömmlichen Zonenplatte bis auf die in die Platte eingefügten Löcher undurchlässig. Eine derartige Löcheranordnung ergibt für das in Fig. 3 a angegebene Objekt eine Intensitätsverteilung auf dem Schirm 40, der der Fig. 3 b entspricht. Entsprechend erzeugt eine punktförmige Lichtquelle ein der Fig. 5 entsprechendes Interferenzmuster auf dem Schirm 40. Die Ausbildung der Intensitätsverteilung in quadratischer Form in Fig. 5 ist eine für die Berechnung dieser Intensitätsverteilung vorgenommene Annahme.

[0033] In Fig. 2 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung dargestellt. Kohärentes VUV-Licht (Vakuum-Ultraviolett) 21, wird wie schematisch durch den Pfeil dargestellt ist, auf eine Zonenplatte gestrahlt. Das kohärente VUV-Licht 21 wird beispielsweise durch ein Synchrotron oder einen freien Elektronenlaser (FEL) erzeugt. Bei einem freien Elektronenlaser, der beispielsweise beim Deutschen Elektronen Synchrotron in Hamburg, Deutschland, geplant ist, werden 10^{12} mal so viele kohärente Photonen geliefert, wie bei dem Synchrotron der Advanced Light Source in Berkeley, Vereinigte Staaten von Amerika. Der freie Elektronenlaser, (im folgenden FEL genannt), hat eine maximale Leistung von 5 GW. Das VUV-Licht 21 wird durch die Zonenplatte 30, bei der zur Vereinfachung der Darstellung keine Löcher dargestellt sind, auf eine Probe 45 in einen Fokus 50 fokussiert. Bei dieser Ausführungsform werden dann die aus der Probe herausgeschlagenen Elektronen e-, die im wesentlichen aus der Oberfläche herrühren, mit einem Detektor 41 detektiert. Der Detektor kann winkel-, raum- und energieaufgelöst ausgestaltet sein. Um zu verschiedenen Bereichen der Probe zu gelangen, ist in diesem Beispiel ein Scanner 60 vorgesehen, der die Zonenplatte 30 in X, Y und Z-Richtung bewegen kann. Alternativ hierzu könnte die Probe 40 bewegt werden.

[0034] Die Zonenplatte 30 umfaßt in diesem Ausführungsbeispiel ein gut wärmeleitendes Material wie Kup-

fer oder ein hochschmelzendes Metall, um die in der Zonenplatte 30 absorbierte Wärme gut abzuführen. Ggf. können weitere Kühlsysteme vorgesehen sein.

[0035] Wie oben schon dargestellt, ist die Fig. 3 b das Abbild des Objektes der Fig. 3 a auf dem Schirm 40 bei einer geordneten Zonenplatte 30 gemäß dem Ausführungsbeispiel der Fig. 1. Die Löcher 31 der Zonenplatte 30 können allerdings auch ungeordneter angeordnet sein, wie beispielsweise durch Hernehmen von Zufallszahlen für n (ganze Zahl, die für den n. Ring der Zonenplatte steht) und einem Winkel in Polar-Koordinaten. Die Fig. 3 c stellt ein Abbild des Objekts der Fig. 3 a mit einer derartigen Zonenplatte 30 dar.

[0036] Eine entsprechende Zonenplatte ist in Fig. 4 a dargestellt. Hierbei sind mit einem Zufallszahlengenerator die Nummern des jeweiligen Rings und der Winkel, gemessen vom Zentrum der Zonenplatte, vorgegeben worden und es ist dann an dieser Stelle auf der Zonenplatte ein Loch 31 hergestellt worden, allerdings nur dann, wenn in einem vorgebbaren Abstand von einigen nm kein weiterer Punkt vorher schon vergeben wurde. Die Seitenlänge der Zonenplatte 30 entspricht in diesem Beispiel 2 µm. Die Löcher haben in diesem Ausführungsbeispiel einen Durchmesser von 30 nm. Bei Verwendung von Licht mit einer Energie von 200 eV ergeben sich die Intensitätsverteilungen der Fig. 4 b und 4 c. Fig. 4 b stellt die Intensitätsverteilung entlang der Zonenachse dar. An der rechten Seite der Fig. 4 b ist der Fokus dargestellt (zu erkennen am Zentrum der Intensität). Der Bereich von der linken Seite der Fig. 4 b bis zum Fokus beträgt 1500 nm.

[0037] Fig. 4 c stellt eine Intensitätsverteilung auf dem Schirm senkrecht zur Zonenachse dar. Die Abzisse reicht von -20 nm bis + 20nm.

[0038] Es ist klar zu erkennen, daß im wesentlichen ausschließlich Intensität in dem Fokus vorherrscht und kaum Intensität außerhalb des Fokus.

[0039] Anstelle von Löchern und beispielsweise metallischen Zonenplatten können auch metallische Schichten auf Polysilizium mit üblichen Lithographie-Verfahren strukturiert werden.

[0040] Fig. 6 zeigt ein Bild einer Punktlichtquelle, wie in Fig. 5, nur mit einer durch Zufallszahlen erzeugten Zonenplatte 30 erzeugt. Es ist deutlich zu erkennen, daß weniger Intensität in den Nebenmaxima auf dem Schirm 40 vorherrschen.

[0041] Bei Verwendung üblicher Zonenplatten, also mit ringförmigen Zonen ohne Vorsehen von undurchlässigen Bereichen der an sich durchlässigen Zonen, existiert im Verhältnis viel mehr Intensität in den Nebenmaxima als in diesen Ausführungsbeispielen. Durch die erfindungsgemäßen Ausführungsformen werden diese Nebenmaxima im wesentlichen unterdrückt, wodurch eine besonders gute Fokussierung der Intensität der Strahlen in einen Punkt ermöglicht wird. Durch die erfindungsgemäßen Zonenplatten können Meßsysteme geschaffen werden, die eine sehr hohe Ortsauflösung haben. Die Ortsauflösung ist im wesentlichen begrenzt

durch die Beugungsgrenzen. Bei Verwendung von für die zu untersuchenden Proben oder die zu bearbeitenden Proben wenig absorbierender Strahlung ist es möglich, im inneren der Probe bzw. im inneren von Körpern Messungen von der geometrischen oder elektronischen Struktur durchzuführen und ferner das in diesen Bereichen befindliche Material bei Verwendung von hoher Leistung zu verändern. Dieses ist insbesondere für die Materialbearbeitung und die Medizintechnik von großem Interesse. Es ist ferner möglich, dreidimensionale Muster bzw. Strukturen zu erzeugen und insbesondere Halbleiterbauelemente ohne aufwendige chemische Verfahren im Bulk selbst zu bearbeiten.

[0042] In Fig. 7 ist schematisch eine Schnittlinie A-A durch die Zonenplatte 30 dargestellt. Wird nun anstelle der gesamten Zonenplatte nur der Bereich links der Schnittlinie in der Fig. 7 als Zonenplatte 30 benutzt, liegt der Fokus bei einer Aufsicht wie in Fig. 7 dargestellt, rechts neben der Zonenplatte, wodurch insbesondere bei Meßsystemen ein größerer Meßbereich bezüglich der zu vermessenden Winkel ermöglicht wird. Bei Verwendung einer nicht aufgeteilten Zonenplatte ist diese üblicherweise für gewisse Detektoren im Weg. Dieses Problem wird durch die Verwendung lediglich eines Teils der Zonenplatte minimiert. Eine derartige geteilte Zonenplatte wird bevorzugterweise für die Photoemission benutzt, um insbesondere die aus der Normalen der Probe emittierten Elektronen zu vermessen.

Bezugszeichenliste

[0043]

10	Lampe
20	Licht
21	kohärentes VUV-Licht
30	Zonenplatte
31	Loch
40	Schirm
41	Detektor
45	Probe
50	Fokus
60	Scanner

e	Elektronen
b	Brennweite
λ	Wellenlänge
n	ganze Zahl

Patentansprüche

1. Optisches Element zur Fokussierung von elektromagnetischen Strahlen (20, 21) oder Strahlen von Elementarteilchen, insbesondere von Röntgenstrahlen, umfassend eine Fresnelsche Zonenplatte (30) mit Ringzonen, die durchlässig für die Strahlen (20, 21) sind und Ringzonen, die für die Strahlen

(20, 21) undurchlässig sind, dadurch gekennzeichnet, daß die für die Strahlen (20, 21) durchlässigen Ringzonen der Fresnelschen Zonenplatte (30) teilweise für die Strahlen (20, 21) undurchlässig sind.

2. Optisches Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die für die Strahlen durchlässigen Bereiche derart angeordnet sind, daß eine Verringerung der Intensität von Beugungsnebenmaxima erreicht wird.

3. Optisches Element nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß im wesentlichen die Intensität der Beugungsnebenmaxima unterdrückt wird.

4. Optisches Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die für die Strahlen (20, 21) durchlässigen Ringzonen bis auf jeweils wenigstens einen Bereich (31) undurchlässig sind, wobei die maximale Ausdehnung des jeweiligen Bereichs (31) durch

$$(2)^{\frac{1}{2}}((nb\lambda)^{\frac{1}{2}} - ((n-1)b\lambda)^{\frac{1}{2}})$$

gegeben ist, wobei n eine ganze Zahl, b eine Brennweite und λ die Wellenlänge der Strahlen (20, 21) ist.

5. Optisches Element nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der durchlässige Bereich (31) jeweils ein Kreis ist, dessen Durchmesser der radialen Ausdehnung der jeweiligen durchlässigen Ringzonen angepaßt ist.

6. Optisches Element nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der durchlässige Bereich (31) jeweils ein Kreis ist, dessen Durchmesser kleiner als 100 nm ist.

7. Optisches Element nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Durchmesser zwischen 20 nm und 40 nm liegt.

8. Optisches Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element ein für die Strahlen (20, 21) im wesentlichen durchlässiges Trägermaterial und eine für die Strahlen (20, 21) undurchlässige Beschichtung umfaßt.

9. Optisches Element nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Trägermaterial Silizium ist und die Beschichtung ein Metall umfaßt.

10. Optisches Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das optische Element im wesentlichen aus einem

für die Strahlen (20, 21) undurchlässigen Material besteht und die für die Strahlen (20, 21) durchlässigen Bereiche durch Aussparungen (31) des Materials gegeben sind.

11. Optisches Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die zentrale Zone der Zonenplatte (30) undurchlässig ist. 5
12. Optisches Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß je Zone maximal ein durchlässiger Bereich (31) vorgesehen ist, wobei maximal ein durchlässiger Bereich (31) auf jeder radialen Strecke vom Zentrum der Zonenplatte zum Rand hin angeordnet ist. 10
13. Meßsystem, insbesondere zum Vermessen von inneren Bereichen dreidimensionaler Proben mit hoher Ortsauflösung, umfassend wenigstens ein optisches Element (30) nach einem oder mehreren der Patentansprüche 1 bis 12, eine Strahlenquelle (20) und wenigstens einen Detektor (40, 41). 15
14. Meßsystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Probe (45) zwischen einem optischen Element und dem Detektor (41) angeordnet ist. 20
15. Meßsystem nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine Reihenfolge Strahlenquelle (10) - optisches Element (30) - Probe (45) - optisches Element (30) - Detektor (40, 41) vorgesehen ist. 25
16. Meßsystem nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Elemente die gleiche Brennweite (b) aufweisen und von den weiteren für die optischen Elemente spezifischen Merkmalen wenigstens eines sich unterscheidet. 30
17. Apparatur zur Veränderung der physikalischen, chemischen und/oder biologischen Eigenschaften eines Bereichs einer Probe (45), insbesondere eines inneren Bereichs einer Probe umfassend eine kohärente intensive Strahlenquelle (21) und ein optisches Element (30) nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12. 35
18. Apparatur nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß in dem zu verändernden Bereich der Probe (45) die Probe (45) schmelzbar ist, chemisch veränderbar ist oder dort angeordnete lebende Zellen zerstörbar sind. 40
19. Optische Speichereinrichtung mit wenigstens einer optischen Strahlenquelle, einem optischen Element nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12, einem optischen Speicherelement und ei-

nem Strahlendetektor.

20. Optische Speichereinrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß mittels dieser der Speicherinhalt des Speicherelements lesbar und/oder beschreibbar ist. 45
21. Verwendung wenigstens eines optischen Elements (30) nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12 zur Materialbearbeitung insbesondere im Inneren von Körpern. 50
22. Verwendung wenigstens eines optischen Elements (30) nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12 zur Veränderung oder Zerstörung von lebenden Zellen und/oder Gewebe von Lebewesen und/oder von Datenträgermaterial. 55
23. Verwendung wenigstens eines optischen Elements (30) nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 12 in einer optischen Speichereinrichtung mv

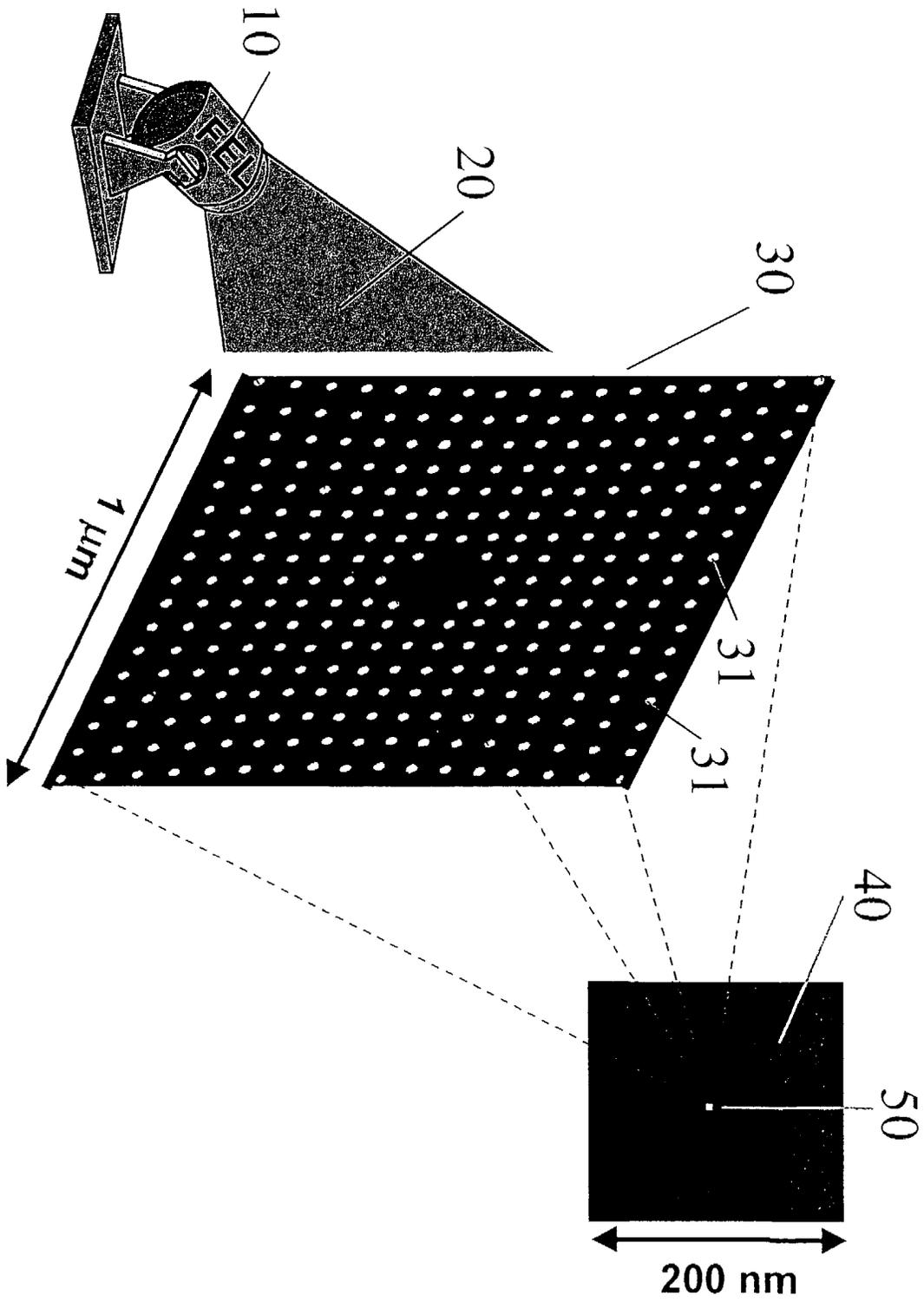


Fig. 1

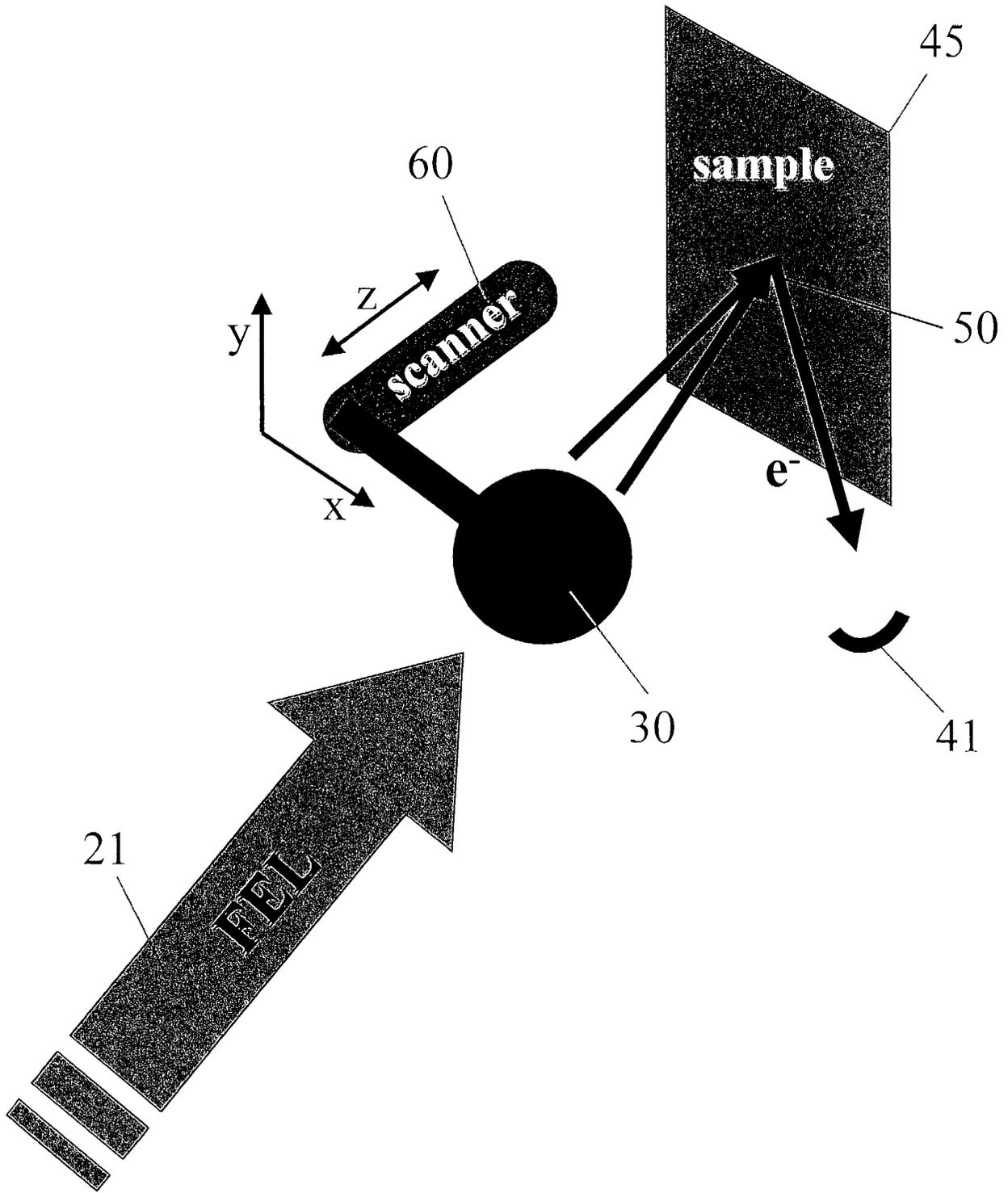


Fig. 2

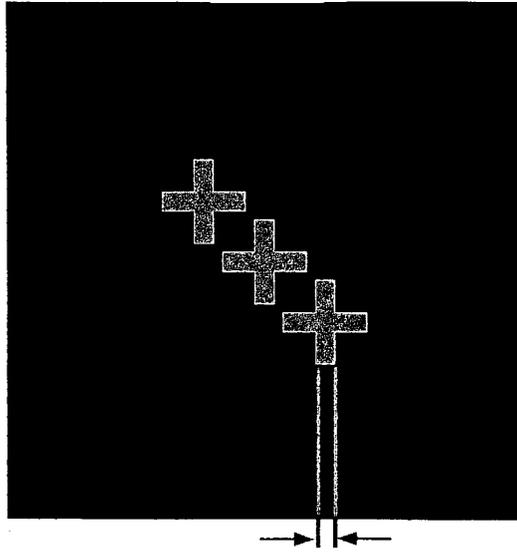


Fig. 3a

20 nm

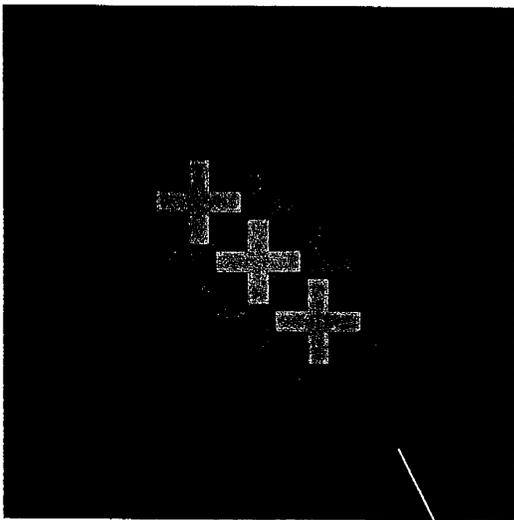


Fig. 3b

40

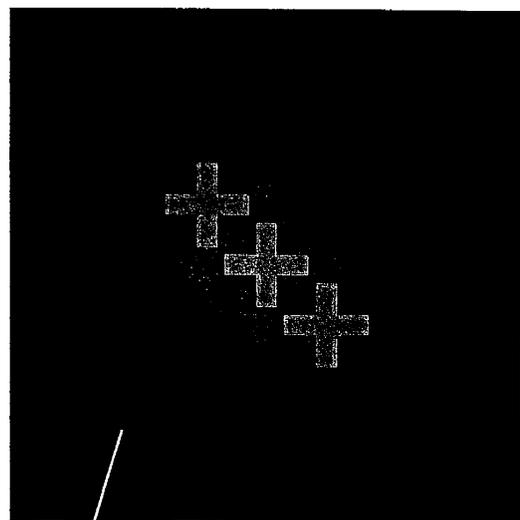


Fig. 3c

40

Fig.4b

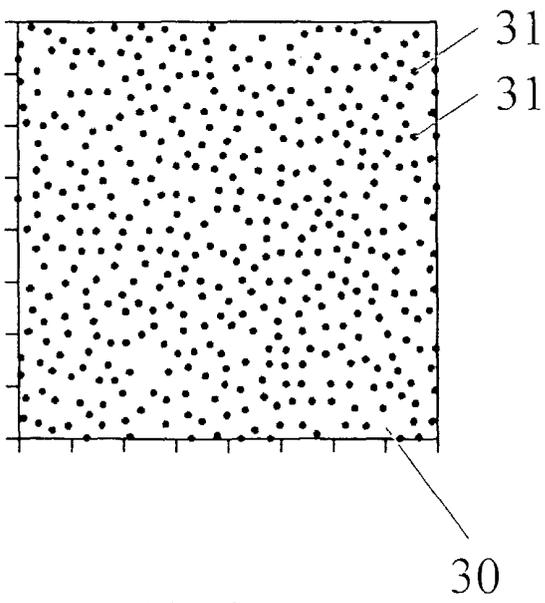
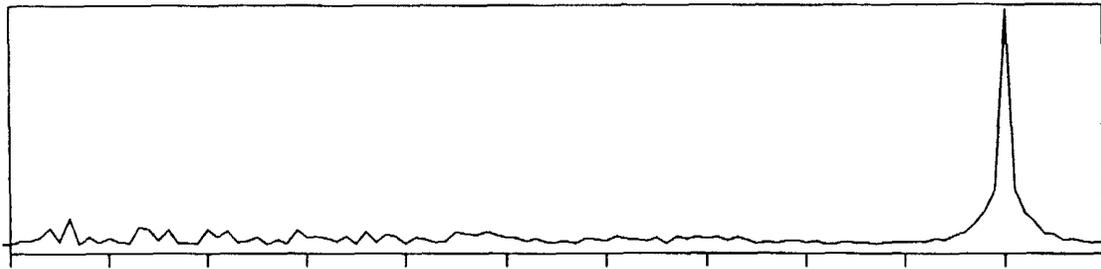


Fig.4a

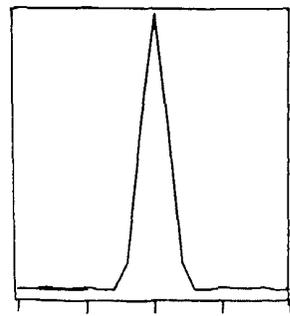


Fig.4c

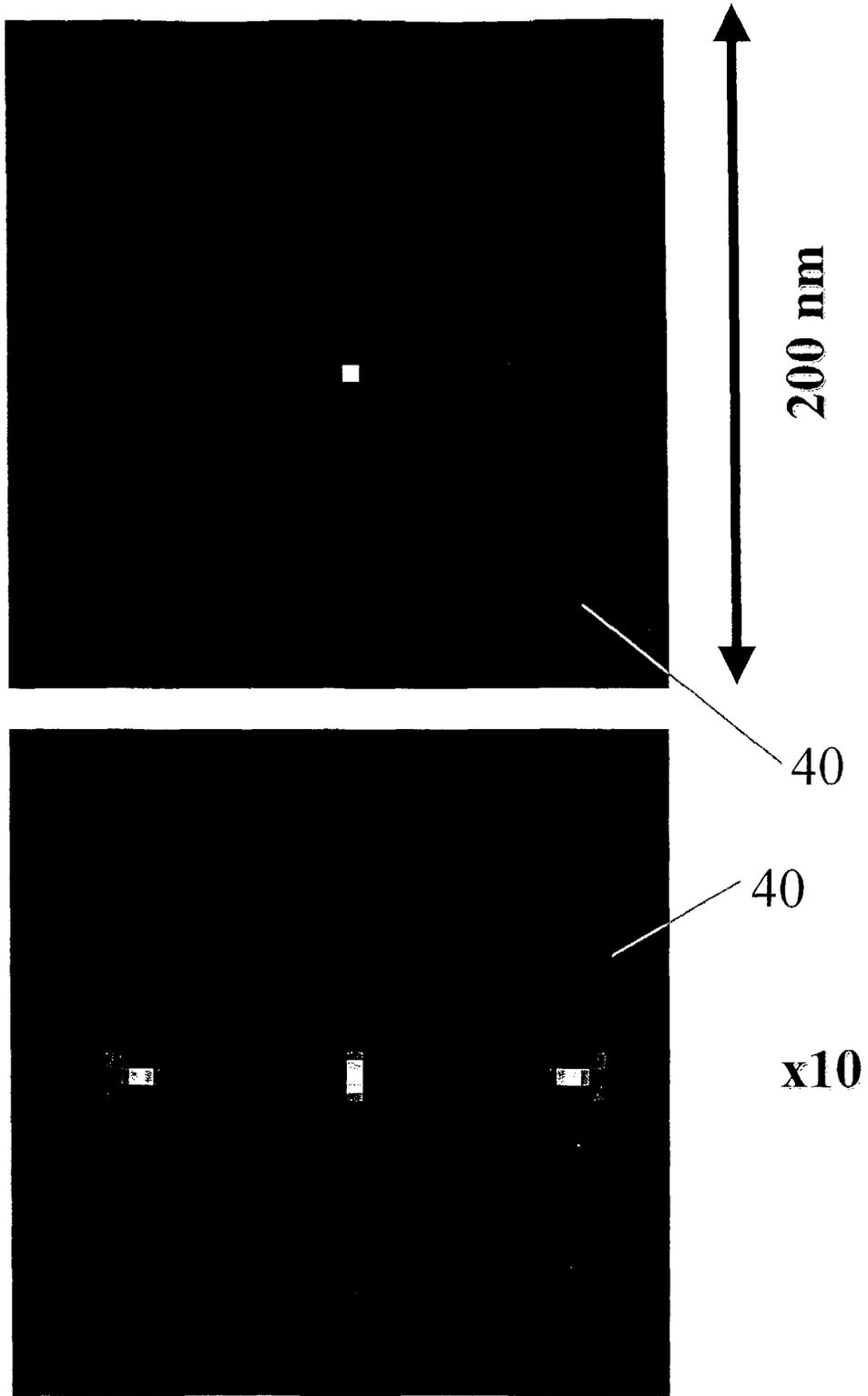


Fig. 5

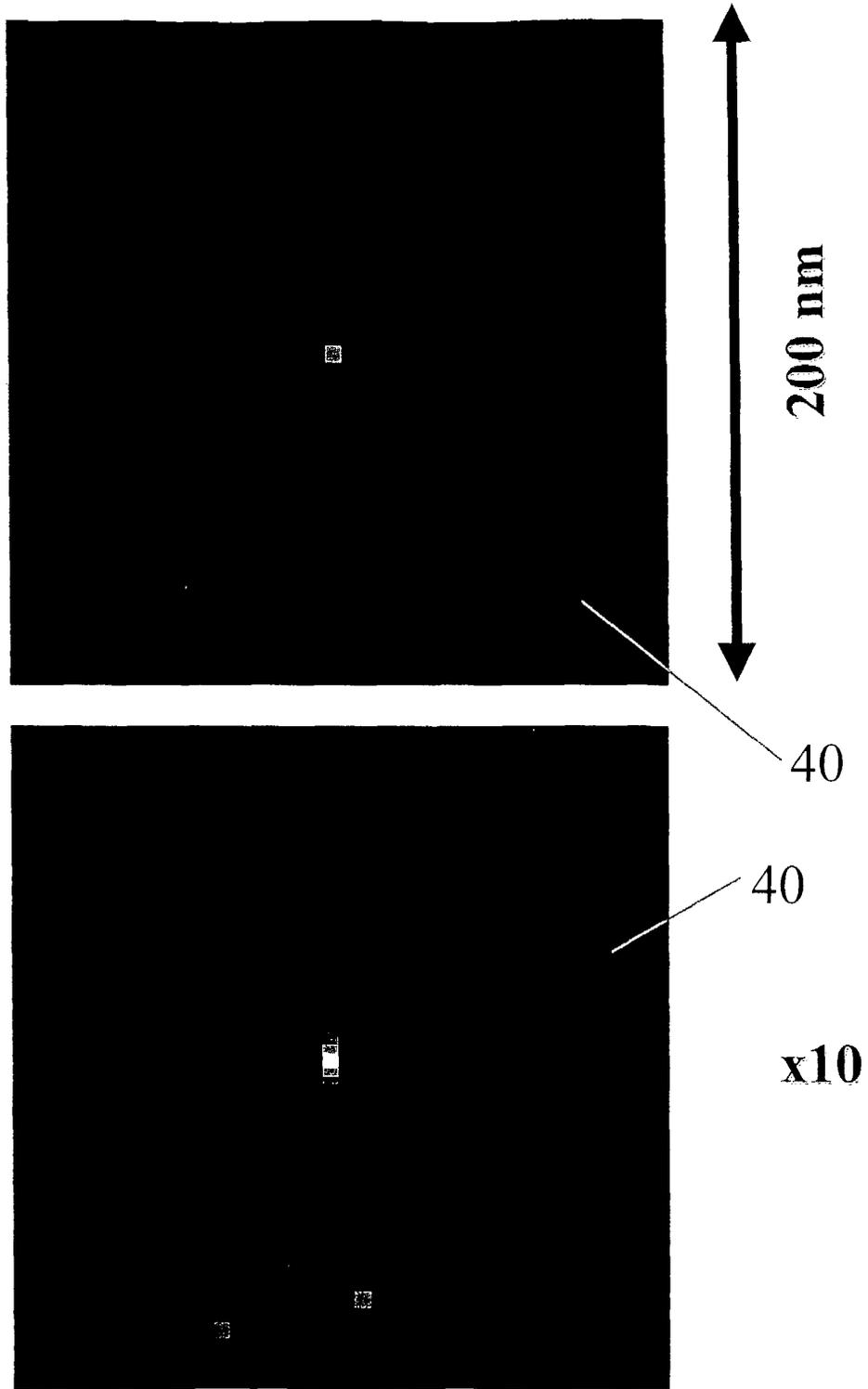


Fig. 6

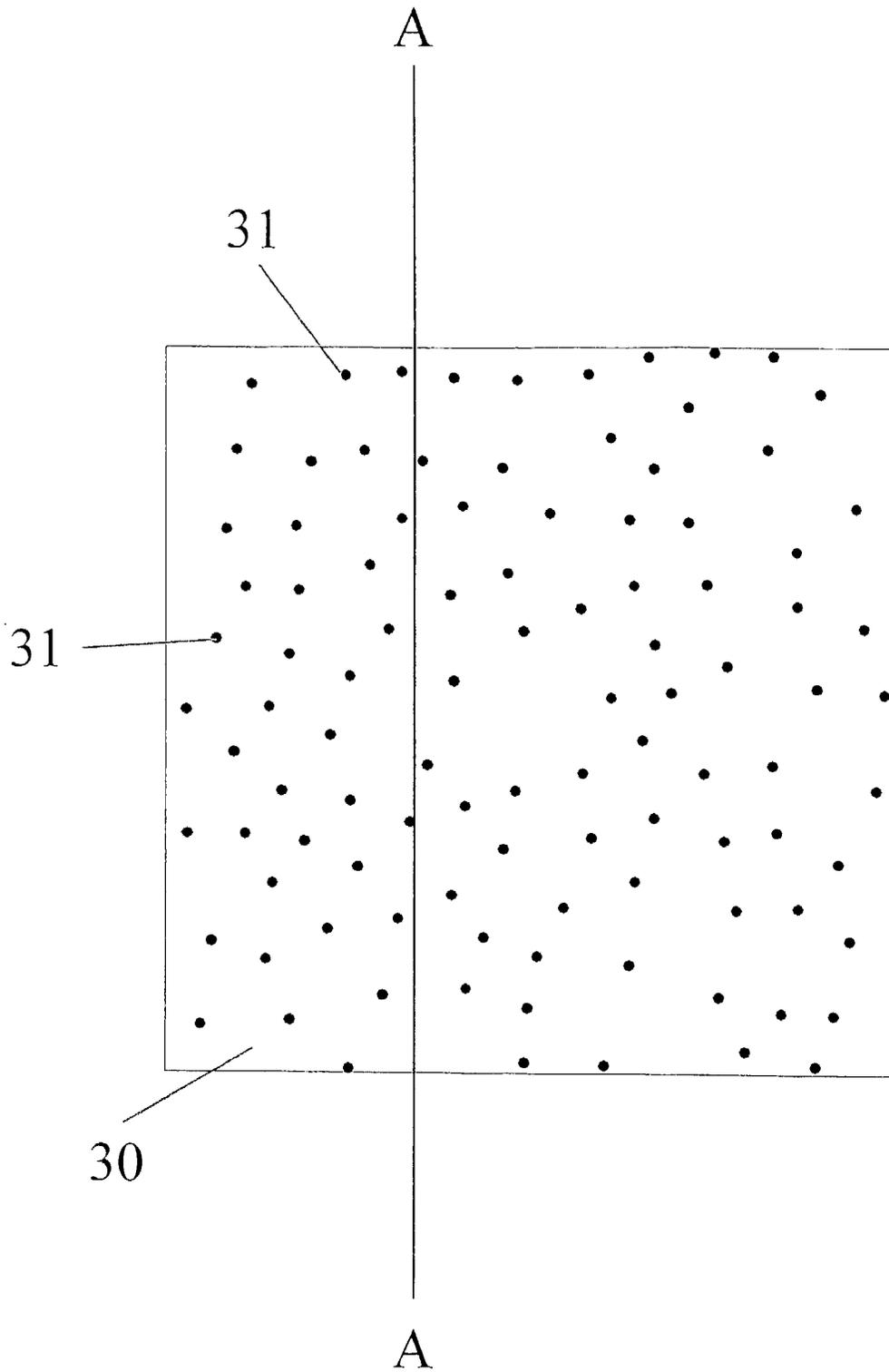


Fig. 7