



(10) **DE 10 2018 202 428 B3** 2019.05.09

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 202 428.6**
 (22) Anmeldetag: **16.02.2018**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **09.05.2019**

(51) Int Cl.: **H01J 37/26 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Carl Zeiss Microscopy GmbH, 07745 Jena, DE

(74) Vertreter:
**Patent- und Rechtsanwälte Diehl & Partner GbR,
80636 München, DE**

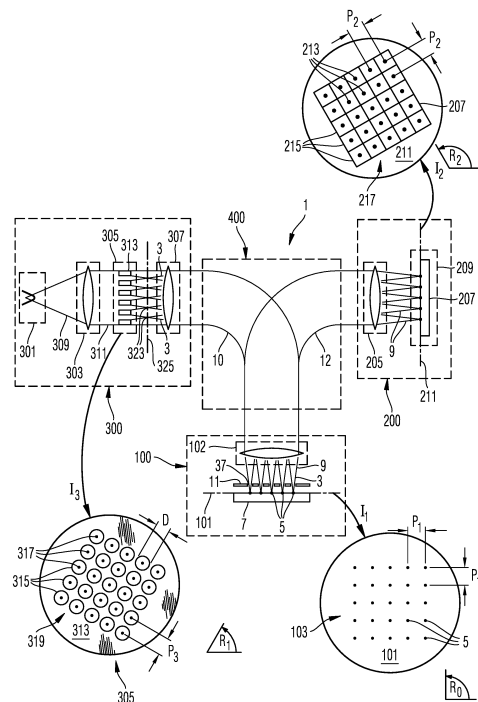
(72) Erfinder:
**Zeidler, Dirk, 73447 Oberkochen, DE; Schubert,
Stefan, 73447 Oberkochen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2010 / 0 320 382	A1
US	2016 / 0 064 180	A1
US	2016 / 0 284 505	A1
US	2017 / 0 154 756	A1

(54) Bezeichnung: **Vielstrahl-Teilchenmikroskop**

(57) Zusammenfassung: Vielstrahl-Teilchenmikroskop mit einer Vielstrahl-Teilchenquelle 300, einer Objektivlinse 102, einer Detektoranordnung 200 und einer zwischen der Objektivlinse 102 und der Objektebene 101 angeordneten Multi-Aperturplatte 11, welche eine Vielzahl von Öffnungen aufweist. Die Multi-Aperturplatte umfasst eine Vielzahl von Konvertern, welche von Primär-Teilchenstrahlen an einem Objekt erzeugte Rückstreuerelektronen in Elektronen niedrigerer Energie umzuwandeln, welche Elektronen bereitstellen, die von der Detektoranordnung detektierte Elektronenstrahlen bilden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Vielstrahl-Teilchenmikroskop.

[0002] Aus US 2016/0064180 A1 ist ein Vielstrahl-Teilchenmikroskop bekannt, welches eine Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen erzeugt, von denen ein jeder durch eine eigene Objektivlinse auf einem Objekt fokussiert wird. Von dem Objekt ausgehende Sekundärelektronen oder Rückstreuielektronen werden von einem Detektor detektiert, wobei einem jeden der Teilchenstrahlen ein eigener Detektor zugeordnet ist.

[0003] Beispielsweise aus WO 2012/041464 A1 und DE 10 2016 120 902 A1 sind Vielstrahl-Teilchenmikroskope bekannt, bei welchen eine Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen eines Bündels aus Primär-Teilchenstrahlen auf ein Objekt fokussiert werden. Die Primär-Teilchenstrahlen erzeugen an den Orten ihres Auftreffens auf dem Objekt Sekundärelektronen, welche durch ein an das Objekt angelegtes elektrisches Feld von dem Objekt weg beschleunigt und zu Sekundär-Teilchenstrahlen geformt werden, welche auf eine Detektoranordnung mit einer Vielzahl von Detektoren gerichtet werden. Hierbei erzeugt jeder einzelne Primär-Teilchenstrahl am Ort seines Auftreffens auf dem Objekt einen dem Primär-Teilchenstrahl zugeordneten Sekundär-Teilchenstrahl, und der Sekundär-Teilchenstrahl trifft auf wenigstens einen ihm zugeordneten Detektor der Detektoranordnung, so dass durch Detektieren der auf diesen wenigstens einen Detektor treffenden Teilchenintensität Information zu dem Ort des Objekts gewonnen werden kann, auf welchen der Primär-Teilchenstrahl gerichtet ist. Das Bündel aus Primär-Teilchenstrahlen kann durch das Vielstrahl-Teilchenmikroskop abgelenkt werden und das Objekt kann relativ zu dem Vielstrahl-Teilchenmikroskop verlagert werden, um dessen Oberfläche systematisch mit den Primär-Teilchenstrahlen abzutasten und aus den dabei detektierten Intensitäten an Sekundär-Teilchenstrahlen ein elektronenmikroskopisches Bild des Objekts zu gewinnen.

[0004] Vielstrahl-Teilchenmikroskope ähnlicher Bauart sind aus US 2010/0320382 A1, US 2016/0284505 A1 und US 2017/0154756 A1 bekannt, wobei Letztere im Strahlengang zwischen dem Objekt und dem Detektor eine Zoomlinse aufweist, um zwischen einem Betriebsmodus zur Detektion von Sekundärelektronen und einem Betriebsmodus zur Detektion von Rückstreuielektronen umzuschalten.

[0005] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, weitere Möglichkeiten zur Detektion von Rückstreuielektronen mittels einem Vielstrahl-Teilchenmikroskop vorzuschlagen.

[0006] Erfindungsgemäß umfasst ein Vielstrahl-Teilchenmikroskop eine Vielstrahl-Teilchenquelle, welche dazu konfiguriert ist, eine Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen zu erzeugen; eine Objektivlinse, welche von Strahlengängen der Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen durchsetzt ist und dazu konfiguriert ist, die Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen jeweils auf eine Objektebene zu richten und dort zu fokussieren; eine Detektoranordnung, welche dazu konfiguriert ist, Intensitäten einer Vielzahl von Elektronenstrahlen zu detektieren, wobei Elektronen der Elektronenstrahlen durch Teilchen der Primär-Teilchenstrahlen an einem in der Objektebene anordenbaren Objekt erzeugt werden.

[0007] Im Betrieb des Vielstrahl-Teilchenmikroskops durchsetzt ein jeder der Primär-Teilchenstrahlen eine Apertur einer Multi-Aperturplatte und trifft fokussiert auf dem Objekt auf. Am Ort des Auftreffens auf dem Objekt erzeugt der Primär-Teilchenstrahl Sekundärelektronen, welche aus dem Objekt austreten und hin zu der Multi-Aperturplatte beschleunigt werden. Diese Sekundärelektronen durchsetzen die Apertur der Multi-Aperturplatte in eine Richtung weg von dem Objekt und bilden einen Elektronenstrahl, welcher die Objektivlinse durchsetzt und zu der Detektoranordnung geführt wird.

[0008] Die durch den Primär-Teilchenstrahl erzeugten Sekundärelektronen haben bei ihrem Austritt aus der Oberfläche des Objekts typischerweise kinetische Energien, welche unabhängig von der kinetischen Energie der auftreffenden Primär-Teilchen sind und typischerweise kleiner als 50 eV sind. Allerdings werden durch den Primär-Teilchenstrahl üblicherweise auch sogenannte Rückstreuielektronen erzeugt, welche an der Stelle des Auftreffens des Primär-Teilchenstrahls aus dem Objekt austreten und kinetische Energien aufweisen, welche größer als 50 eV sind und bis zur kinetischen Energie der Primär-Teilchen reichen können. Die Erfinder haben erkannt, dass diese im Vergleich zu den Sekundärelektronen höherenergetischen Elektronen in nur sehr geringem Umfang zu der Detektoranordnung geführt werden und dort Detektionssignale erzeugen. Bei Einstrahl-Teilchenmikroskopen ist es jedoch möglich, Rückstreuielektronen gesondert zu detektieren und aus Detektionssignalen von Rückstreuielektronen elektronenmikroskopische Bilder zu erzeugen, welche verschiedene Materialien in einem Objekt mit einem hohen Kontrast voneinander unterscheidbar darstellen. Die Erfinder haben festgestellt, dass es wünschenswert wäre, auch bei dem Vielstrahl-Teilchenmikroskop die Möglichkeit zu haben, Rückstreuielektronen effizient zu detektieren. Die Erfinder haben weiter erkannt, dass die Elektronenstrahlen, welche vom Objekt ausgehen und zu der Detektoranordnung geführt werden, im Wesentlichen aus Sekundärelektronen gebildet sind, da diese aufgrund ihrer niedrigen Energie beim Austritt aus der Oberfläche des Objekts

zu den einzelnen Elektronenstrahlen gebündelt werden können, während die wesentlich höherenergetischen Rückstreuielektronen nicht zu einzelnen Elektronenstrahlen geformt werden können, welche ausgehend von dem Ort des Auftreffens des Primär-Teilchenstrahls auf das Objekt hin zu einem diesen Ort zugeordnetem Element der Detektoranordnung geführt werden können.

[0009] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen umfasst die Multi-Aperturplatte des Vielstrahl-Teilchenmikroskops deshalb eine Vielzahl von Konvertern, wobei an jeder Öffnung der Vielzahl von Öffnungen wenigstens ein Konverter der Vielzahl von Konvertern vorgesehen ist, wobei die Konverter dazu konfiguriert sind, von den Primär-Teilchenstrahlen an dem Objekt erzeugte Rückstreuielektronen, welche an dem Objekt kinetische Energien aufweisen, die größer sind als ein vorbestimmter erster Energieschwellwert, in Elektronen umzuwandeln, welche an dem Konverter kinetische Energien aufweisen, die kleiner sind als ein vorbestimmter zweiter Energieschwellwert und welche Elektronen bereitstellen, die die von der Detektoranordnung detektierten Elektronenstrahlen bilden.

[0010] Damit werden die Rückstreuielektronen mit ihrer vergleichsweise hohen kinetischen Energie nahe an dem Objekt und nahe an dem Ort, an dem sie aus der Oberfläche des Objekts austreten, in Elektronen wesentlich niedrigerer kinetischer Energie umgewandelt. Diese Elektronen niedrigerer kinetischer Energie entstehen in der Nähe der Auftrefforte der Primär-Teilchenstrahlen auf dem Objekt. Die dort entstehenden Elektronen niedriger kinetischer Energie können dann - wie die an dem Ort des Auftreffens des Primär-Teilchenstrahls erzeugten Sekundärelektronen - ebenfalls zu Elektronenstrahlen geformt werden und der Detektoranordnung zur Detektion zugeführt werden. Dort erzeugen diese umgewandelten niederenergetischen Elektronen Detektionssignale, welche proportional zur Anzahl der an dem Ort des Auftreffens des Primär-Teilchenstrahls erzeugten rückgestreuten Elektronen ist. Somit ist es aufgrund der Bereitstellung der Konverter an der Multi-Aperturplatte möglich, mit dem Vielstrahl-Teilchenmikroskop ebenfalls Rückstreuielektronen zu detektieren.

[0011] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen umfassen die Konverter jeweils eine dünne Membran, welche im Wesentlichen parallel zu der Objektebene orientiert ist. Die dünnen Membranen können hierbei die Aperturen in der Multi-Aperturplatte definieren bzw. begrenzen. Die an dem Objekt erzeugten Rückstreuielektronen können auf die der Objektebene zugewandte Oberfläche der Membran auftreffen und durch diese in die Elektronen niedrigerer Energie umgewandelt werden, welche wenigstens zum Teil aus der von der Objektebene abgewandten Oberfläche der Membran austreten und zu dem Elektro-

nenstrahl beitragen können, welcher die Objektivlinse durchsetzt und der Detektoranordnung zugeführt wird.

[0012] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen liegt die Dicke der Membranen in einem Bereich von 0,5 nm bis 50 nm und insbesondere in einem Bereich von 4 nm bis 20 nm.

[0013] Eine hohe Umwandlungsrate von Rückstreuielektronen in die Elektronen niedrigerer Energie kann beispielsweise dann erreicht werden, wenn die Membranen aus einem Material aus schweren Elementen bestehen. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen bestehen die Membranen aus einem Material, welches aus Atomen besteht, die Kernladungszahlen aufweisen, welche im Mittel größer als 40 sind. Beispiele für derartige Materialien sind Gold und andere. Membranen aus schweren Elementen sollten jedoch ausreichend dünn sein, um eine zu starke Absorption der Sekundärelektronen durch die Membran zu vermeiden. Beispielsweise kann eine Monolage aus Gold als Membran verwendet werden. Die dünne Schicht aus Gold kann beispielsweise auf eine dickere stabilere Trägerschicht aus beispielsweise Aluminium aufgedampft sein.

[0014] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen sind die Konverter jeweils aus einem Material gebildet, welches an Innenwänden der Öffnungen der Multi-Aperturplatte vorgesehen ist. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen ist dieses Material verschieden von einem Material, welches das Strukturmaterial der Multi-Aperturplatte ist. Das Material, welches den Konverter bildet, ist dann beispielsweise als eine Schicht an den Innenwänden der Öffnungen der Multi-Aperturplatte angebracht.

[0015] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen besteht das Material aus Atomen, die Kernladungszahlen aufweisen, welche im Mittel größer als 40 sind.

[0016] Gemäß weiteren beispielhaften Ausführungsformen weisen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte eine konische Gestalt derart auf, dass sich der Querschnitt einer Öffnung in Richtung weg von der Objektebene verkleinert. Gemäß beispielhaften Ausführungsformen weisen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte auf ihrer der Objektebene zugewandten Seite eine erste Querschnittsfläche und auf ihrer von der Objektebene abgewandten Seite eine zweite Querschnittsfläche auf, wobei die erste Querschnittsfläche wenigstens 1,5 mal und insbesondere wenigstens 2,0 mal größer ist als die zweite Querschnittsfläche.

[0017] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen umfasst das Vielstrahl-Teilchenmikroskop ein Spannungsversorgungssystem, welches dazu konfiguriert

ist, dem Objekt und der Multi-Aperturplatte jeweils ein einstellbares elektrisches Potential zuzuführen.

[0018] Gemäß einer beispielhaften Ausführungsform hierin ist das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert, in einem ersten Betriebsmodus einer dem Objekt zuweisenden Seite der Multi-Aperturplatte und dem Objekt elektrische Potentiale derart zuzuführen, dass das Objekt relativ zu der Multi-Aperturplatte auf einem negativen elektrischen Potential liegt, so dass an dem Objekt erzeugte Sekundärelektronen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte durchsetzen und ebenfalls Elektronen bereitstellen, die die von der Detektoranordnung detektierten Elektronenstrahlen bilden; und wobei das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert ist, in einem zweiten Betriebsmodus der dem Objekt zuweisenden Seite der Multi-Aperturplatte und dem Objekt elektrische Potentiale derart zuzuführen, dass das Objekt relativ zu der Multi-Aperturplatte auf einem positiven elektrischen Potential liegt, so dass an dem Objekt erzeugte Sekundärelektronen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte nicht durchsetzen. Damit ist es möglich, wahlweise zwischen einem Betriebsmodus, in welchem Sekundärelektronen zu den durch die Detektoranordnung detektierten Elektronenstrahlen beitragen, und einem Betriebsmodus umzuschalten, in dem Sekundärelektronen nicht zu den detektierten Elektronen beitragen und somit lediglich die an dem Objekt erzeugten Rückstreuelektronen zu den detektierten Elektronen beitragen. In diesem Fall ist das durch die detektierten Elektronen erzeugte elektronenmikroskopische Bild ein so genanntes reines Rückstreuelektronenbild.

[0019] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen umfasst die Multi-Aperturplatte drei voneinander isolierte leitfähige Schichten, wobei das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert ist, den drei leitfähigen Schichten jeweils einstellbare elektrische Potentiale zuzuführen.

[0020] Der erste Energieschwellwert kann beispielsweise größer als 50 eV oder größer als 200 eV sein. Der zweite Energieschwellwert kann beispielsweise kleiner als 200 eV und insbesondere kleiner als 100 eV sein. Die Anzahl der Primär-Teilchenstrahlen kann beispielsweise größer als 7 oder größer als 50 sein.

[0021] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen ist die Multi-Aperturplatte mit einem Abstand von der Objektebene angeordnet, welcher kleiner als 200 µm, insbesondere kleiner als 50 µm, insbesondere kleiner als 30 µm, insbesondere kleiner als 20 µm und insbesondere kleiner als 10 µm ist.

[0022] Gemäß beispielhaften Ausführungsformen ist die Multi-Aperturplatte mit einem Abstand von der Objektebene angeordnet, welcher kleiner ist als ein

geringster Abstand der Aperturen der Multi-Aperturplatte voneinander.

[0023] Gemäß weiteren beispielhaften Ausführungsformen ist ein minimaler Abstand zwischen zwei einander benachbarten Primär-Teilchenstrahlen an der Multi-Aperturplatte kleiner als 50 µm, insbesondere kleiner als 30 µm, insbesondere kleiner als 20 µm und insbesondere kleiner als 12 µm ist.

[0024] Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand von Figuren näher erläutert. Hierbei zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erläuterung einer Funktionsweise eines Vielstrahl-Teilchenmikroskops gemäß einer Ausführungsform;

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Teils des Vielstrahl-Teilchenmikroskops der **Fig. 1**;

Fig. 3 eine schematische Schnittdarstellung einer Multi-Aperturplatte mit Konvertern des Vielstrahl-Teilchenmikroskops der **Fig. 1** gemäß einer ersten Ausführungsform;

Fig. 4 eine schematische Schnittdarstellung einer Multi-Aperturplatte mit Konvertern des Vielstrahl-Teilchenmikroskops der **Fig. 1** gemäß einer zweiten Ausführungsformen; und

Fig. 5 eine schematische Schnittdarstellung einer Multi-Aperturplatte mit Konvertern des Vielstrahl-Teilchenmikroskops der **Fig. 1** gemäß einer dritten Ausführungsformen.

[0025] **Fig. 1** ist eine schematische Darstellung eines Vielstrahl-Teilchenmikroskops, welches mehrere Teilchenstrahlen einsetzt. Das Vielstrahl-Teilchenmikroskop erzeugt mehrere Primär-Teilchenstrahlen, welche auf ein zu untersuchendes Objekt treffen, um dort Sekundär-Teilchen zu erzeugen, welche von dem Objekt ausgehen und zu Sekundär-Teilchenstrahlen geformt werden, welche nachfolgend detektiert werden. Das Vielstrahl-Teilchenmikroskop **1** ist vom Rasterelektronenmikroskoptyp („scanning electron microscope“, SEM), welches als Primär-Teilchenstrahlen Elektronenstrahlen **3** einsetzt, die an Orten **5** auf einer Oberfläche des Objekts **7** auftreffen und dort mehrere Elektronenstrahlflecken bzw. Elektronenspots erzeugen. Die an diesen Strahlflecken auf das Objekt auftreffenden Elektronen des Primär-Teilchenstrahls erzeugen Elektronen als Sekundär-Teilchen, welche zu Sekundär-Teilchenstrahlen geformt und detektiert werden. Diese als Sekundär-Teilchen erzeugten Elektronen werden häufig hinsichtlich ihrer kinetischen Energie in Rückstreuelektronen und Sekundärelektronen eingeteilt. Im Allgemeinen werden Elektronen mit kinetischen Energien, die kleiner als 50 eV sind, als Sekundärelektronen und Elektronen mit kinetischen Energien, die größer als 50 eV sind, als Rückstreuelektronen bezeichnet.

[0026] Allerdings können die Primär-Teilchenstrahlen auch Ionenstrahlen sein. Diese können beim Auftreffen auf dem Objekt ebenfalls Elektronen als Sekundär-Teilchen erzeugen, welche zu Sekundär-Teilchenstrahlen geformt und detektiert werden. Auch hier können Elektronen mit kinetischen Energien, die kleiner als 50 eV sind, als Sekundärelektronen und Elektronen mit kinetischen Energien, die größer als 50 eV sind, als Rückstreuielektronen bezeichnet werden.

[0027] Das zu untersuchende Objekt **7** kann von einer beliebigen Art sein und beispielsweise einen Halbleiter-Wafer, eine biologische Probe und eine Anordnung miniaturisierter Elemente oder dergleichen umfassen. Die Oberfläche des Objekts **7** ist in einer Objektebene **101** einer Objektivlinse **102** eines Objektivlinsensystems **100** angeordnet.

[0028] Der vergrößerte Ausschnitt **I1** der **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf die Objektebene **101** mit einem regelmäßigen rechtwinkligen Feld **103** von Auftrefforten **5** von Primär-Teilchenstrahlen **3**, welche in der Ebene **101** gebildet werden. In **Fig. 1** beträgt die Zahl der Auftrefforte **25**, welche als ein 5×5 -Feld **103** angeordnet sind. Die Zahl **25** an Auftrefforten ist eine aus Gründen der vereinfachten Darstellung gewählte kleine Zahl. In der Praxis kann die Zahl an Strahlen bzw. Auftrefforten wesentlich größer gewählt werden, wie beispielsweise 20×30 , 100×100 und dergleichen.

[0029] In der dargestellten Ausführungsform ist das Feld **103** von Auftrefforten **5** ein im Wesentlichen regelmäßiges rechtwinkliges Feld mit einem konstanten Abstand p_1 zwischen benachbarten Auftrefforten. Beispielhafte Werte des Abstands p_1 sind $50 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ oder $10 \mu\text{m}$. Es ist jedoch auch möglich, dass das Feld **103** andere Symmetrien aufweist, wie beispielsweise eine hexagonale Symmetrie.

[0030] Ein Durchmesser der in der Objektebene **101** geformten Strahlflecken kann klein sein. Beispielhafte Werte dieses Durchmessers betragen 1 nm , 5 nm , 10 nm und 30 nm . Das Fokussieren der Partikelstrahlen **3** zur Formung der Strahlflecken **5** erfolgt durch das Objektivlinsensystem **100**.

[0031] Die auf das Objekt treffenden Teilchen, welche in dem hier erläuterten Beispiel Elektronen sind, erzeugen wiederum Teilchen, welche im Wesentlichen Elektronen sind, und welche von der Oberfläche des Objekts **7** ausgehen. Die von der Oberfläche des Objekts **7** ausgehenden Elektronen werden durch das Objektivlinsensystem **100** zu Elektronenstrahlen **9** geformt. Das Vielstrahl-Teilchenmikroskop **1** stellt einen Sekundärstrahlengang **12** bereit, um die Vielzahl von Elektronenstrahlen **9** einem Detektionssystem **200** zuzuführen. Das Detektionssystem **200** umfasst eine Elektronenoptik mit einem Projektivlin-

sensystem **205**, um die Elektronenstrahlen **9** auf einen Elektronen-Multi-Detektor **209** zu richten.

[0032] Der Ausschnitt **I2** in **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf eine Ebene **211**, in welcher einzelne Detektionsbereiche angeordnet sind, auf welche die Elektronenstrahlen **9** an Orten **213** auftreffen. Die Auftrefforte **213** bilden ein zweites Feld **217** mit einem regelmäßigen Abstand p_2 der Auftrefforte voneinander. Beispielhafte Werte des Abstands p_2 sind $10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ und $500 \mu\text{m}$.

[0033] Die Primär-Teilchenstrahlen **3** werden durch eine Vielstrahl-Teilchenquelle **300** erzeugt, welche wenigstens eine Elektronenquelle **301** mit einem Elektronenemitter, wenigstens eine Kollimationslinse **303**, eine Multi-Aperturanordnung **305** und ein Feldlinsensystem **307** umfasst. Die Elektronenquelle **301** erzeugt aus von dem Elektronenemitter emittierten Elektronen einen divergierenden Elektronenstrahl **309**, welcher durch die Kollimationslinse **303** kollimiert wird, um einen Strahl **311** zu formen, welcher die Multi-Aperturanordnung **305** beleuchtet.

[0034] Der Ausschnitt **I3** in **Fig. 1** zeigt eine Draufsicht auf die Multi-Aperturanordnung **305**. Die Multi-Aperturanordnung **305** umfasst eine Multi-Aperturplatte **313**, welche eine Mehrzahl von darin ausgebildeten Öffnungen bzw. Aperturen **315** aufweist. Mittelpunkte **317** der Öffnungen **315** sind in einem Feld **319** angeordnet, welches dem Feld **103** entspricht, welches durch die Strahlflecken **5** in der Objektebene **101** gebildet wird. Ein Abstand p_3 der Mittelpunkte **317** der Aperturen **315** voneinander kann beispielhafte Werte von $5 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ aufweisen. Die Durchmesser D der Aperturen **315** sind kleiner als der Abstand p_3 der Mittelpunkte der Aperturen voneinander. Beispielhafte Werte der Durchmesser D sind $0,2 \times p_3$, $0,4 \times p_3$ und $0,8 \times p_3$.

[0035] Elektronen des beleuchtenden Strahls **311** durchsetzen die Aperturen **315** und bilden Elektronenstrahlen **3** als Primär-Teilchenstrahlen. Elektronen des beleuchtenden Strahls **311**, welche auf die Platte **313** treffen, werden durch diese abgefangen und tragen nicht zur Bildung der Elektronenstrahlen **3** bei.

[0036] Die Multi-Aperturanordnung **305** fokussiert die Elektronenstrahlen **3** derart, dass in einer Ebene **325** Strahlfoki **323** gebildet werden. Ein Durchmesser der Foki **323** kann beispielsweise 2 nm , 10 nm , 100 nm und $1 \mu\text{m}$ betragen.

[0037] Das Feldlinsensystem **307**, ein Strahlteiler **400** und die Objektivlinse **102** stellen eine erste abbildende Teilchenoptik bereit und bilden einen Primärstrahlengang **10**, um die Ebene **325**, in der die Foki **323** gebildet werden, auf die Objektebene **101** abzubilden, so dass dort ein Feld **103** von Auftrefforten **5**

bzw. Strahlflecken auf der Oberfläche des Objekts **7** gebildet wird.

[0038] Die Objektivlinse **102**, der Strahlteiler **400** und das Projektivlinsensystem **205** stellen eine zweite abbildende Teilchenoptik bereit und bilden einen Sekundärstrahlengang **12**, um die Objektebene **101** auf die Detektionsebene **211** abzubilden. Die Objektivlinse **102** ist somit eine Linse, welche sowohl Teil des Primärstrahlengang **10** als auch des Sekundärstrahlengangs **12** ist, während das Feldlinsensystem **307** nur dem Primärstrahlengang **10** und das Projektivlinsensystem **205** nur dem Sekundärstrahlengang **12** angehört. Die Objektivlinse **102** wird somit sowohl von den Strahlengängen der Primär-Teilchenstrahlen **3** als auch von den Strahlengängen der (sekundären) Elektronenstrahlen durchsetzt.

[0039] Der Strahlteiler **400** ist in dem Primärstrahlengang **10** zwischen der Multi-Aperturanordnung **305** und dem Objektivlinsensystem **100** angeordnet. Der Strahlteiler **400** ist auch Teil des Sekundärstrahlengangs **12** und ist dort zwischen dem Objektivlinsensystem **100** und dem Detektionssystem **200** angeordnet. Der Strahlteiler **400** trennt die Strahlengänge der Primär-Teilchenstrahlen **10** von den Strahlengängen der (sekundären) Elektronenstrahlen.

[0040] Weitergehende Information zu solchen Vielstrahl-Teilchenmikroskopen und darin eingesetzten Komponenten, wie etwa Teilchenquellen, Multi-Aperturplatten und Linsen, kann aus den internationalen Patentanmeldungen WO 2005/024881, WO 2007/028595, WO 2007/028596 und WO 2007/060017 und den Patentanmeldungen US 2015/0083911 A1, US 2015/0069235 A1, DE 10 2014 008 383 A1, US 6,946,655 B2 und DE 10 2016 120 902 erhalten werden, deren Offenbarung jeweils vollumfänglich durch Inbezugnahme in die vorliegende Anmeldung aufgenommen wird.

[0041] Das Vielstrahl-Teilchenmikroskop **1** umfasst ferner eine zwischen der Objektivlinse **102** und der Objektebene **101** angeordnete Multi-Aperturplatte **11**, welche eine Vielzahl von Öffnungen **37** aufweist. In der in **Fig. 1** erläuterten Ausführungsform sind in der Multi-Aperturplatte **11** **25** Öffnungen derart vorgesehen, dass im Betrieb des Vielstrahl-Teilchenmikroskops **1** eine jede der Öffnungen **37** von einem Primär-Teilchenstrahl **3** durchsetzt wird und von einem (sekundären) Elektronenstrahl **9** durchsetzt werden kann.

[0042] **Fig. 2** zeigt in vereinfachter schematischer Darstellung die Objektivlinse **102**, welche einen Spulenkörper **19**, einen oberen Polschuh **21** und einen unteren Polschuh **22** umfasst, so dass zwischen diesen ein Spalt gebildet ist, an dem ein die Primär-Teilchenstrahlen fokussierendes Magnetfeld erzeugt wird. Die Multi-Aperturplatte **11** ist über eine elek-

trisch isolierende Halterung **31** an dem unteren Polschuh **22** der Objektivlinse **102** gehalten und an diesen befestigt. Alternativ zu der Befestigung der Multi-Aperturplatte **11** an der Objektivlinse **102** ist es möglich, dass ein Aktuator **23** vorgesehen ist, welcher die Aperturplatte aus dem Bereich zwischen der Objektivlinse **102** und der Objektebene **101** wahlweise entfernen oder dort anordnen kann, wobei die Multi-Aperturplatte **11** bei ihrer Anordnung zwischen der Objektivlinse **102** und der Objektebene **101** durch einen geeigneten Mechanismus gegen die als Abstandhalter wirkende Halterung **31** gedrückt wird. Der Aktuator **23** wird über eine Steuerleitung **25** durch eine Steuerung **27** des Vielstrahl-Teilchenmikroskops **1** kontrolliert.

[0043] Die Steuerung **27** umfasst ferner ein Spannungsversorgungssystem, um den Teilchenemitter der Teilchenquelle **301** auf ein erstes elektrisches Potential **U1** zu setzen, den oberen Polschuh **21** der Objektivlinse **102** auf ein zweites elektrisches Potential **U2** zu setzen, die Multi-Aperturplatte **11** auf ein drittes elektrisches Potential **U3** zu setzen, die Objekthalterung **17** mit dem darauf angeordneten Objekt **7** auf ein viertes elektrisches Potential **U4** zu setzen und den unteren Polschuh **22** der Objektivlinse **102** auf ein fünftes elektrisches Potential **U5** zu setzen. Zur Zuführung der elektrischen Potentiale **U1**, **U2**, **U3**, **U4** und **U5** an den Teilchenemitter der Teilchenquelle **301**, den oberen Polschuh **21**, die Multi-Aperturplatte **11**, die Objekthalterung **17** und den unteren Polschuh **22** sind Potentialzuführungsleitungen **29** zwischen diesen Komponenten und der Steuerung **27** vorgesehen.

[0044] Ein zwischen dem Ende des oberen Polschuhs **21** und dem Ende des unteren Polschuhs **22** sich in der Objektivlinse erstreckender magnetischer Eisenkreis ist durch einen elektrischen Isolator **24** getrennt, welcher es ermöglicht, den oberen und den unteren Polschuh auf unterschiedliche elektrische Potentiale **U2** bzw. **U5** zu setzen. Der Isolator **24** ist hierbei so gestaltet, dass die beiden an den Isolator **24** angrenzenden Teile des Eisenkreises geometrisch überlappen, um einen geringen Widerstand für den magnetischen Fluss zu erreichen.

[0045] Die Differenz zwischen den Potentialen **U1** und **U4** bestimmt die kinetische Energie, mit welcher die Teilchen der Primär-Teilchenstrahlen **3** auf das Objekt treffen. Diese Differenz kann beispielsweise Werte zwischen 50 V und 3 kV annehmen.

[0046] Im Strahlengang der Primär-Teilchenstrahlen **3** kann in der Teilchenquelle **301** oder nachfolgend eine Elektrode (Anode) angeordnet sein, um die Teilchen auf eine große kinetische Energie zu beschleunigen, so dass sie die Strecke bis zur Objektivlinse **102** und durch diese hindurch schnell zurücklegen. Diese Elektrode kann ebenfalls auf das zweite elektri-

sche Potential **U2** gesetzt werden. Die Differenz zwischen U_1 und U_2 bestimmt dann die kinetische Energie der Teilchen zwischen der Vielstrahl-Teilchenquelle und dem Objektiv **102** und kann beispielsweise größer als 5 kV, größer als 15 kV oder größer als 25 kV sein. Zwischen dem oberen Polschuh **21**, der auf das zweite elektrische Potential **U2** gesetzt ist, und dem unteren Polschuh **22**, der auf das fünfte elektrische Potential **U5** gesetzt ist, besteht ein elektrisches Feld, welches die Primärteilchen auf ihrem Weg hin zu dem Objekt **7** verzögert und die Elektronenstrahlen **9** auf ihrem Weg hin zu dem Detektor beschleunigt. Ferner ist die Multi-Aperturplatte **11** auf das dritte elektrische Potential **U3** gesetzt.

[0047] Fig. 3 ist eine vergrößerte Darstellung der Multi-Aperturplatte **11** im Querschnitt. Die Multi-Aperturplatte **11** umfasst ein tragendes Substrat **401**, auf welches eine Konverterschicht **403** aufgebracht ist. In der Konverterschicht sind die Öffnungen **37**, welche von den Primär-Teilchenstrahlen **3** auf ihrem Weg hin zu dem Objekt **7** durchsetzt werden, angebracht. Die Öffnungen **37** können beispielsweise kreisrunde Öffnungen sein und einen Durchmesser von beispielsweise 1 μm , 2 μm oder 5 μm aufweisen.

[0048] Das Substrat **401** weist Durchgangslöcher **405** mit einem Durchmesser auf, welcher wesentlich größer ist als der Durchmesser der Ausnehmungen **37** in der Konverterschicht **403** und welche bezüglich der Ausnehmungen **37** in der Konverterschicht **403** derart angeordnet sind, dass die Öffnungen **405** in dem Substrat **401** durch die Konverterschicht teilweise abgedeckt werden. Die Konverterschicht **403** definiert und begrenzt somit die von den Primär-Teilchenstrahlen **3** durchsetzten Öffnungen **37**. Ferner bestehen Bereiche der Konverterschicht **403** entlang des Umfangs der Öffnungen **37**, an welchen die Konverterschicht **403** nicht von dem Substrat **401** unterstützt wird.

[0049] Der Durchmesser der Ausnehmungen **37** in der Konverterschicht **403** ist dabei auf den Strahldurchmesser der Primär-Teilchenstrahlen **3** so abgestimmt, dass die Primärteilchen vor dem Auftreffen auf dem Objekt **7** keinen nennenswerten Störuntergrund an von diesen unmittelbar an der Konverterschicht erzeugten Sekundärelektronen verursachen. Beispielsweise beträgt der Strahldurchmesser der Primär-Teilchenstrahlen **3** höchstens 70%, insbesondere höchstens 50% und insbesondere höchstens 20% des Durchmessers der Ausnehmungen **37** in der Konverterschicht **403**. Der Kippunkt des Strahlableitensystems zum Abscannen des Objekts **7** mit den Primär-Teilchenstrahlenbündeln **3** sollte so nahe an der Ebene der Konverterschicht **403** liegen, dass auch beim Abscannen des Objekts eine Auswanderung der Primär-Teilchenstrahlenbündel **3** in der Ebene der Konverterschicht **403** hinreichend klein bleibt, so dass die Primärteilchen vor dem Auftreffen auf

dem Objekt **7** keinen nennenswerten Störuntergrund an von diesen unmittelbar an der Konverterschicht erzeugten Sekundärelektronen verursachen.

[0050] Die auf das Objekt **7** treffenden Teilchen des Primär-Teilchenstrahls **3** erzeugen an dem Auftreffort **5** auf der Oberfläche des Objekts **7** durch Wechselwirkung der Teilchen mit dem Material des Objekts **7** Elektronen, welche aus der Oberfläche des Objekts **7** austreten. Üblicherweise werden diese durch die Primärteilchen erzeugten Elektronen in zwei Kategorien unterteilt, nämlich zum einen Sekundärelektronen und zum anderen Rückstreuielektronen. Die Rückstreuielektronen weisen bei ihrem Austritt aus der Oberfläche des Objekts **7** kinetische Energien auf, welche der kinetischen Energie der einfallenden Primärteilchen entsprechen oder etwas kleiner als diese sind. Die Sekundärelektronen weisen Energien auf, welche wesentlich kleiner sind als die kinetische Energie der auftreffenden Primärteilchen.

[0051] Sowohl die Rückstreuielektronen als auch die Sekundärelektronen treten aus der Oberfläche des Objekts **7** in einem breiten Raumwinkelbereich aus. Beim herkömmlichen Vielstrahl-Teilchenmikroskop besteht zwischen der Objektivlinse und dem Objekt ein elektrisches Feld, welches zum einen die Teilchen der Primär-Teilchenstrahlen auf ihrem Weg hin zu dem Objekt verzögert und zum anderen die aus dem Objekt austretenden Elektronen weg von dem Objekt beschleunigt. Da die aus dem Objekt austretenden Sekundärelektronen bei ihrem Austritt aus dem Objekt recht kleine kinetische Energien aufweisen, wird deren kinetische Energie, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung im Wesentlichen durch das elektrische Feld bestimmt, welches die Elektronen weg von dem Objekt beschleunigt. Insbesondere sind die Geschwindigkeitskomponenten der aus dem Objekt austretenden Sekundärelektronen in Richtung parallel zu der Oberfläche des Objekts gering, so dass sich die Sekundärelektronen nach einer erfolgten Beschleunigung durch das zwischen dem Objekt und der Objektivlinse bereitgestellte elektrische Feld im Wesentlichen senkrecht zu der Objektebene **101** von dem Objekt **7** weg bewegen. Bei einem ausreichenden Abstand der Orte **5** voneinander überlagern sich Trajektorien von Sekundärelektronen, welche an einander benachbarten Orten **5** aus dem Objekt **7** austreten, deshalb kaum. Dadurch ist es möglich, aus den aus dem Objekt **7** austretenden Sekundärelektronen Elektronenstrahlen **9** zu formen, welche in dem Sekundärstrahlengang **12** als separate Strahlen zu der Detektoranordnung **211** geführt werden können.

[0052] Da die Rückstreuielektronen bei ihrem Austritt aus dem Objekt **7** eine recht große kinetische Energie aufweisen, wird deren kinetische Energie, Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung nach Beschleunigung in dem zwischen der Objektivlinse

und dem Objekt **7** bereitgestellten elektrischen Feld nicht vorrangig durch dieses Feld sondern ebenfalls maßgeblich durch deren Bewegungsrichtung beim Austritt aus der Oberfläche des Objekts bestimmt. Wenn bei einem gegebenen Abstand zwischen einander benachbarten Auftrefforten **5** der Primärstrahlen **3** auf dem Objekt **7** die parallel zu der Objektebene **101** orientierten Komponenten der Geschwindigkeiten der aus dem Objekt austretenden Rückstreuelektronen ausreichend groß sind, so können sich Trajektorien von Rückstreuelektronen, welche an einander benachbarten Orten **5** aus dem Objekt **7** austretenden, überlappen. Dann ist es nicht möglich, solche Rückstreuelektronen, welche von verschiedenen Auftrefforten **5** ausgehen, durch den Sekundärstrahlengang **12** als separate Strahlen zu der Detektoranordnung zu führen. Diese Situation entsteht bei Rückstreuelektronen aufgrund von deren relativ großer kinetischen Energie beim Austritt aus dem Objekt für einen relativ großen Teil der austretenden Rückstreuelektronen, so dass die Effizienz, mit der Rückstreuelektronen den einzelnen Auftrefforten **5** zuordenbar detektiert werden, sehr gering ist. Dies führt dazu, dass beim herkömmlichen Vielstrahl-Teilchenmikroskop Kontraste zwischen verschiedenen Materialien im Objekt, welche mit dem Einstrahl-Teilchenmikroskop bei Detektion der Rückstreuelektronen einfach sichtbar gemacht werden können, kaum detektierbar sind.

[0053] Die an der Multi-Aperturplatte **11** vorgesehene Konverterschicht **403** ist dazu konfiguriert, Rückstreuelektronen in Sekundärelektronen **409** zu konvertieren. Hierzu treffen Rückstreuelektronen **407**, welche an einem Ort **5** in der Ebene **101** aus dem Objekt **7** austreten, auf die dem Objekt **7** zugewandte Seite der Konverterschicht **403**, und zwar in den Bereichen, in denen die Konverterschicht **403** nicht von dem Substrat **401** unterstützt wird. Die Rückstreuelektronen **407** erzeugen in der Konverterschicht **403** Sekundärelektronen, von welchen wenigstens ein Teil **409** auf der von dem Objekt **7** abgewandten Seite der Konverterschicht **403** aus dieser austreten. Diese konvertierten Sekundärelektronen **409** weisen bei ihrem Austritt aus der Konverterschicht **403** eine kinetische Energie auf, welche wesentlich geringer ist als die kinetische Energie der Rückstreuelektronen **407** bei deren Austritt aus dem Objekt **7**. Diese Sekundärelektronen **409** weisen insbesondere geringe Geschwindigkeitskomponenten parallel zu der Objektebene **101** auf und werden in dem zwischen der Objektivlinse **102** und dem Objekt **7** bereitgestellten elektrischen Feld weg von dem Objekt **7** beschleunigt und können durch die Sekundäroptik **12** der Detektoranordnung **209** zugeführt werden, ohne dass die Trajektorien von Sekundärelektronen **409**, welche aus Rückstreuelektronen **407** erzeugt werden, die von verschiedenen Orten **5** an der Oberfläche des Objekts **7** ausgehen, überlappen. Damit können diese Sekundärelektronen **409** Elektronenstrah-

len formen, welche durch die Sekundäroptik **12** als separate Strahlen der Detektoranordnung zugeführt werden. Insbesondere können diese Sekundärelektronen **409** gemeinsam mit den Sekundärelektronen, welche direkt an den Auftrefforten **5** aus dem Objekt **7** austreten und die Öffnungen **37** durchsetzen, Elektronenstrahlen bilden, deren Intensitäten von der Detektoranordnung detektierbar sind. Die Konverterschicht **403** ermöglicht es somit, Messsignale zu erzeugen, welche einem bestimmten Auftreffort **5** eines Primärelektronenstrahls **3** auf dem Objekt **7** zuordenbar sind und die Intensität der an diesem Ort **5** erzeugten Rückstreuelektronen **407** repräsentieren.

[0054] Hierbei ist es möglich, das Vielstrahlen-Teilchenmikroskop **1** in zwei voneinander verschiedenen Betriebsmoden zu betreiben. In einem ersten der beiden Betriebsmoden ist das Potential **U3**, welches der Multi-Aperturplatte **11** zugeführt wird, größer als das Potential **U4**, welches dem Objekt **7** zugeführt wird. Hierdurch werden die aus der Oberfläche des Objekts **7** austretenden Sekundärelektronen hin zu der Multi-Aperturplatte **11** beschleunigt und durchsetzen teilweise die Öffnungen **37** in der Konverterschicht **403**, so dass diese Sekundärelektronen zu den Elektronenstrahlen beitragen, welche aus den Sekundärelektronen **409** gebildet werden, welche aus der Konverterschicht **403** nach Umwandlung aus Rückstreuelektronen **407** gebildet werden. In dem ersten Betriebsmodus werden somit sowohl Sekundärelektronen als auch Rückstreuelektronen, welche aus dem Objekt **7** austreten, detektiert.

[0055] In einem zweiten der beiden Betriebsmoden ist das der Multi-Aperturplatte **11** zugeführte elektrische Potential **U3** kleiner als das dem Objekt **7** zugeführte elektrische Potential **U4**. Dies führt dazu, dass die aus dem Objekt austretenden Sekundärelektronen niedriger kinetische Energie die Multi-Aperturplatte **11** nicht erreichen und insbesondere nicht durch die Öffnungen **37** in der Konverterschicht **403** hindurchtreten können. Die aus dem Objekt austretenden Sekundärelektronen erzeugen deshalb keine durch die Detektoranordnung erzeugten Detektionssignale. Lediglich Rückstreuelektronen werden in dem zweiten Betriebsmodus detektiert.

[0056] Die Konverterschicht **403** besteht vorzugsweise aus einem Material mit großer Kernladungszahl. Ein Beispiel für ein geeignetes Material ist Gold. Eine Dicke d der Konverterschicht ist so bemessen, dass Rückstreuelektronen **407**, welche auf die dem Objekt **7** zugewandte Seite der Konverterschicht **407** treffen, zu einer hohen Zahl von Sekundärelektronen **409** führen, welche auf der von dem Objekt **7** abgewandten Seite der Konverterschicht **403** aus dieser austreten. Die derart bestimmte optimale Dicke hängt von der kinetischen Energie der Rückstreuelektronen **407** ab und ist damit wiederum abhängig von der kinetischen Energie mit der die Primärteilchen auf

das Objekt auftreffen. Allerdings muss die Dicke d der Konverterschicht **403** nicht dieser optimalen Dicke entsprechen, und es ist möglich, eine Konverterschicht **403** einer gegebenen Dicke d für einen breiten Bereich an kinetischen Energien der Primärteilchen beim Auftreffen auf das Objekt einzusetzen. Die Dicke der Konverterschicht kann beispielsweise in einem Bereich einer Atomlage bis 40 nm oder 0,5 nm bis 20 nm liegen.

[0057] Das Substrat **401** ist aus einem Material gebildet, welches die Funktion erfüllen kann, als tragende Struktur für die Konverterschicht **403** zu dienen. Beispielsweise kann das Substrat **401** aus einem Silizium-Einkristall gebildet sein. Hierzu kann eine Platte aus einem Silizium-Einkristall, welcher das Substrat **401** der Multi-Aperturplatte **11** bildet, mit einem Material beschichtet werden, welches die Konverterschicht **403** der Multi-Aperturplatte **11** bildet, und die Öffnungen **405** in der Siliziumplatte und die Öffnungen **37** in der Konverterschicht **403** können durch lithographische Verfahren in die Siliziumplatte bzw. die Konverterschicht eingebracht werden, um die Multi-Aperturplatte **11** zu fertigen.

[0058] Fig. 4 zeigt eine der Fig. 3 entsprechende Darstellung einer Multi-Aperturplatte **11**, welche dazu konfiguriert ist, Rückstreuелеktronen in Sekundärelektronen umzuwandeln, welche Elektronenstrahlen bilden, welche durch die Sekundäroptik **12** als separate Strahlen der Detektoranordnung **209** zugeführt werden.

[0059] Bei dem in Fig. 4 gezeigten Beispiel einer Multi-Aperturplatte ist das Konvertermaterial nicht als Schicht **403** auf einer Flachseite eines Substrats **401** der Multi-Aperturplatte **11** aufgebracht, wie dies in dem Beispiel der Fig. 3 der Fall ist, sondern es ist als Schicht an Innenwänden von Öffnungen **405** in dem Substrat **401** angebracht. Damit bilden die Oberflächen der Schichten **411** aus Konvertermaterial die Öffnungen **37** der Multi-Aperturplatte **11**, welche von den Primärstrahlen **3** durchsetzt werden. Aus dem Objekt **7** austretende Rückstreuелеktronen **407** treffen auf die Konverterschicht **411** innerhalb der Aperturen **37** und werden in Sekundärelektronen **409** umgewandelt, welche aus der Schicht **411** in die Öffnung **37** hinein austreten. Diese aus der Konverterschicht austretenden Sekundärelektronen **409** werden durch das zwischen der Objektivlinse und dem Objekt **7** bereitgestellte elektrische Feld weg von dem Objekt **7** beschleunigt und bilden Strahlen, welche durch die Sekundäroptik **12** der Detektoranordnung **211** zugeführt werden. Somit ist es auch mit einer Multi-Aperturplatte **11** gemäß der in Fig. 4 gezeigten Ausführungsform möglich, aus dem Objekt **7** austretende Elektronen **407** in Sekundärelektronen umzuwandeln, welche durch die Detektoranordnung **209** detektierbar sind. Auch die Multi-Aperturplatte der in Fig. 4 gezeigten Ausführungsform ist in den beiden

Betriebsmoden betreibbar, welche vorangehend im Zusammenhang mit der Fig. 3 erläutert wurden. Diese beiden Betriebsmoden ermöglichen es, sowohl Rückstreuелеktronen alleine als auch Rückstreuелеktronen und Sekundärelektronen, welche beide aus dem Objekt **7** austreten, zu detektieren.

[0060] Bezugszeichen **407'** in Fig. 4 bezeichnet ein Rückstreuелеktron, welches mit einer großen Geschwindigkeitskomponente parallel zur Objektebene **101** an einem Ort **5** von der Oberfläche des Objekts **7** ausgeht. Diesem Rückstreuелеktron **407'** gelingt es, auf die Konverterschicht **411** an der Innenwand der Ausnehmung **37** zu treffen, welche dem Auftreffort **5** des Primärstrahls **3** zugeordnet ist, welcher von dem Ort verschieden ist, von dem das Rückstreuелеktron **407** ausgeht. Das Rückstreuелеktron **407** erzeugt damit Sekundärelektronen **409** in der „falschen“ Ausnehmung **37**, und die daraus resultierenden Detektionsereignisse werden somit dem falschen Primärteilchenstrahl **3** zugeordnet. Dieser Effekt kann als Übersprechen („cross talk“) zwischen verschiedenen Teilchenstrahlen bezeichnet werden.

[0061] Fig. 5 zeigt einen Querschnitt einer Multi-Aperturplatte **11** gemäß einer weiteren Ausführungsform, bei welcher dieser Effekt des Übersprechens reduziert ist.

[0062] Die in Fig. 5 im Querschnitt gezeigte Multi-Aperturplatte **11** weist einen mehrschichtigen Aufbau auf, in welchem die Aperturen **37** angebracht sind. Folgende Schichten sind in der Darstellung der Fig. 5 von oben nach unten, d. h. in Richtung hin zu der Objektebene **101** vorgesehen: Eine elektrisch leitende Schicht **411**, eine Konverterschicht **413**, welche elektrisch isolierend ist, eine elektrisch leitende Schicht **415**, eine elektrisch isolierende Schicht **417** und eine Absorberschicht **419**, welche elektrisch leitend ist.

[0063] Hierbei kann es vorteilhaft sein, wenn die elektrisch leitenden Schichten **411**, **415** oder **419** sich auf einem vorbestimmten elektrischen Potential befinden, welches derart bestimmt ist, dass die Primärstrahlen **3** durch zwischen den elektrisch leitenden Schichten **411**, **415** und **419** entstehende elektrische Felder nicht wesentlich beeinflusst werden. Ferner ist es möglich, dass elektrisch isolierende Konverterschicht **413** einen ausreichend großen verbleibenden Widerstand derart aufweist, dass durch die Schicht hindurch ein Strom fließen kann, welcher während des Betriebs die Potentiale der elektrisch leitenden Schichten **411**, **415** und **419** definiert.

[0064] Die Konverterschicht **413** ist entweder insgesamt aus einem Rückstreuелеktronen **407** in Sekundärelektronen **409** konvertierenden Material gebildet, welches an den Innenwänden der Ausnehmung **37** frei liegt, oder sie ist aus einem lediglich elektrisch isolierenden Material gebildet, bei dem an den Innen-

wänden der Ausnehmungen **37** Schichten aus einem Konvertermaterial angebracht sind, wie dies vorangehend im Zusammenhang mit der in **Fig. 4** gezeigten Ausführungsform erläutert wurde.

[0065] Die Absorberschicht **419** besteht aus einem Material, welches pro auftreffenden Rückstreuelektron sehr wenige Sekundärelektronen und insbesondere wesentlich weniger Sekundärelektronen als das Konvertermaterial erzeugt.

[0066] Hierbei kann es vorteilhaft sein, die Schichten so auszulegen, dass während des Betriebs die Absorberschicht **419** ein um beispielsweise 10 V, 20 V oder 50 V höheres elektrisches Potential aufweist als die Konverterschicht **413**, um zu verhindern, dass an dem Absorber erzeugte Sekundärelektronen zum Konverter und von da zum Detektor gelangen.

[0067] Mit dem Bezugszeichen **407** in **Fig. 5** ist ein Rückstreuelektron bezeichnet, welches von einem Ort **5** auf der Oberfläche des Objekts **7** austritt und die Innenwand derjenigen Apertur **37** trifft, welche dem Ort **5** zugeordnet ist, von dem das Rückstreuelektron **407** ausgeht. Das Rückstreuelektron **407** wird an der Innenwand der Ausnehmung **37** in der Konverterschicht **413** in ein oder mehrere Sekundärelektronen **409** umgewandelt, von denen einige an der von dem Objekt **7** abgewandten Seite der Multi-Aperturplatte aus der Öffnung **37** austreten und wie vorangehend beschrieben, von der Detektoranordnung derart detektiert werden können, dass sie dem richtigen Primär-Teilchenstrahl **3** zugeordnet werden können.

[0068] Mit dem Bezugszeichen **407'** in **Fig. 5** ist ein Rückstreuelektron **407'** gezeigt, welches auf die Innenwand der benachbarten Öffnung **37** und damit auf die Innenwand der „falschen“ Öffnung trifft und damit potentiell ein Übersprechen zwischen verschiedenen detektierten Elektronenstrahlen erzeugen kann. Allerdings sind die Geometrie der Öffnungen **37**, die Dicke der Absorberschicht **419** und der Abstand zwischen der dem Objekt **7** zuweisenden Oberfläche der Multi-Aperturplatte **11** bzw. der Absorberschicht **419** und der Oberfläche des Objekts **7** so gewählt, dass die von dem Ort **5** ausgehenden Rückstreuelektronen **407'**, welche in die benachbarte, „falsche“ Öffnung **37** treffen, dort lediglich auf Innenoberflächen der Öffnung **37** treffen, welche im Bereich der Absorberschicht **419** liegen. Dort werden diese auftreffenden Rückstreuelektronen **407'** allerdings nicht oder in lediglich sehr geringem Maße in Sekundärelektronen umgewandelt, welche schließlich detektiert werden.

[0069] In dem Ausführungsbeispiel der **Fig. 5** ist das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert, an die leitenden Schichten **411**, **415** und **419** verschiedene und jeweils einstellbare elektrische Potentiale anzulegen. Insbesondere sind hierdurch folgende Betriebsweisen möglich:

[0070] Die dem Objekt **7** am nächsten angeordnete Schicht **419** kann relativ zu dem Objekt **7** auf größeres oder kleineres elektrisches Potential gelegt werden, um die vorangehend im Zusammenhang mit der **Fig. 3** beschriebenen zwei Betriebsmoden zu realisieren, in welchen von dem Objekt ausgehende Rückstreuelektronen und Sekundärelektronen gemeinsam detektiert werden oder lediglich Rückstreuelektronen detektiert werden.

[0071] Zwischen den leitenden Schichten **411** und **415** kann eine Potentialdifferenz angelegt werden, welche innerhalb der Ausnehmungen **37** im Bereich der Konverterschicht **413** ein elektrisches Feld erzeugt, welches die an den Wänden der Ausnehmung **37** erzeugten Sekundärelektronen in der **Fig. 5** nach oben und damit weg von dem Objekt **7** beschleunigt. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass ein an der Wand der Ausnehmung **37** erzeugtes Sekundärelektron auch an der Oberseite der Multi-Aperturplatte **11** aus der Öffnung **37** austritt und nicht etwa innerhalb der Öffnung absorbiert wird.

[0072] Die Öffnungen **37** können ferner, wie in **Fig. 5** dargestellt, eine konische Gestalt aufweisen, so dass die Querschnittsfläche der Ausnehmungen **37** in die Richtung hin zu dem Objekt **7** zunimmt. Zusammen mit der Bereitstellung der Absorberschicht **419** ist es damit möglich, den Raumwinkel zu erhöhen, unter dem die Rückstreuelektronen **407** von dem Ort **5** an der Oberfläche des Objekts **7** ausgehen können und an der Innenwand der zugeordneten Ausnehmung **37** in Sekundärelektronen **409** umgewandelt werden, ohne die Wahrscheinlichkeit des Übersprechens zu erhöhen.

[0073] Bei diesem Ausführungsbeispiel ist der Durchmesser der Ausnehmungen **37** auf den Strahldurchmesser der Primär-Teilchenstrahlen **3** so abgestimmt, dass die Primärteilchen vor dem Auftreffen auf dem Objekt **7** keinen nennenswerten Störuntergrund an von diesen unmittelbar an der Konverterschicht **413** erzeugten Sekundärelektronen verursachen. Beispielsweise beträgt der Strahldurchmesser der Primär-Teilchenstrahlen **3** höchstens 70%, insbesondere höchstens 50% und insbesondere höchstens 20% des Durchmessers der Ausnehmungen in den Schichten **411** oder **413**. Der Kippunkt des Strahlablenksystems zum Abscannen des Objekts **7** mit den Primär-Teilchenstrahlenbündeln **3** sollte so nahe an der Ebene des Substrats **401** der Multi-Aperturplatte liegen, dass auch beim Abscannen des Objekts eine Auswanderung der Primär-Teilchenstrahlen **3** innerhalb der Ausnehmungen **37** hinreichend klein bleibt, so dass die Primärteilchen vor dem Auftreffen auf dem Objekt **7** keinen nennenswerten Störuntergrund an von diesen unmittelbar an der Konverterschicht **413** erzeugten Sekundärelektronen verursachen.

Patentansprüche

1. Vielstrahl-Teilchenmikroskop, umfassend:
 eine Vielstrahl-Teilchenquelle (300), welche dazu konfiguriert ist, eine Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen (3) zu erzeugen;
 eine Objektivlinse (102), welche von Strahlengängen der Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen (3) durchsetzt ist und dazu konfiguriert ist, die Vielzahl von Primär-Teilchenstrahlen (3) jeweils auf eine Objektebene (101) zu richten und dort zu fokussieren;
 eine Detektoranordnung (200), welche dazu konfiguriert ist, Intensitäten einer Vielzahl von Elektronenstrahlen (9) zu detektieren, wobei Elektronen der Elektronenstrahlen (9) durch Teilchen der Primär-Teilchenstrahlen (3) an einem in der Objektebene (101) anordenbaren Objekt (7) erzeugt werden; und
 eine zwischen der Objektivlinse (102) und der Objektebene (101) angeordnete Multi-Aperturplatte (11), welche eine Vielzahl von Öffnungen (37) aufweist, wobei verschiedene Öffnungen (37) der Multi-Aperturplatte (11) von Strahlengängen verschiedener Primär-Teilchenstrahlen (3) durchsetzt sind, und wobei die Multi-Aperturplatte (11) eine Vielzahl von Konvertern (403; 411; 413) umfasst, wobei an jeder Öffnung der Vielzahl von Öffnungen wenigstens ein Konverter der Vielzahl von Konvertern vorgesehen ist, wobei die Konverter dazu konfiguriert sind, von den Primär-Teilchenstrahlen an dem Objekt erzeugte Rückstreuungselektronen, welche an dem Objekt kinetische Energien aufweisen, die größer sind als ein vorbestimmter erster Energieschwellwert, in Elektronen umzuwandeln, welche an dem Konverter kinetische Energien aufweisen, die kleiner sind als ein vorbestimmter zweiter Energieschwellwert und welche Elektronen bereitstellen, die die von der Detektoranordnung detektierten Elektronenstrahlen bilden.

2. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 1, wobei die Konverter jeweils dünne Membranen (403) umfassen, welche im Wesentlichen parallel zu der Objektebene (101) orientiert sind.

3. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 2, wobei die an dem Objekt erzeugten Rückstreuungselektronen auf die der Objektebene zugewandte Oberfläche der Membranen auftreffen und die aus den Rückstreuungselektronen umgewandelten Elektronen aus der von der Objektebene abgewandten Oberfläche der Membranen austreten.

4. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 2 oder 3, wobei die Membranen eine Dicke von 0,5 nm bis 50 nm, insbesondere 4 nm bis 20 nm aufweisen.

5. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei die Membranen aus einem Material bestehen, welches aus Atomen besteht, die Kernladungszahlen aufweisen, welche im Mittel größer als 40 sind.

6. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Konverter jeweils durch ein Material (411) gebildet sind, mit welchem Innenwände der Öffnungen (37) der Multi-Aperturplatte (11) beschichtet sind.

7. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 6, wobei das Material aus Atomen besteht, die Kernladungszahlen aufweisen, welche im Mittel größer als 40 sind.

8. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Öffnungen der Multi-Aperturplatte auf ihrer der Objektebene zugewandten Seite eine erste Querschnittsfläche und auf ihrer von der Objektebene abgewandten Seite eine zweite Querschnittsfläche aufweisen, wobei die erste Querschnittsfläche wenigstens 1,5 mal und insbesondere wenigstens 2,0 mal größer ist als die zweite Querschnittsfläche.

9. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 8, ferner umfassend ein Spannungsversorgungssystem (27), welches dazu konfiguriert ist, dem Objekt und der Multi-Aperturplatte jeweils ein einstellbares elektrisches Potential zuzuführen.

10. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 9, wobei das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert ist, in einem ersten Betriebsmodus einer dem Objekt zuweisenden Seite der Multi-Aperturplatte und dem Objekt elektrische Potentiale derart zuzuführen, dass das Objekt relativ zu der Multi-Aperturplatte auf einem negativen elektrischen Potential liegt, so dass an dem Objekt erzeugte Sekundärelektronen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte durchsetzen und ebenfalls Elektronen bereitstellen, die die von der Detektoranordnung detektierten Elektronenstrahlen bilden; und wobei das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert ist, in einem zweiten Betriebsmodus der dem Objekt zuweisenden Seite der Multi-Aperturplatte und dem Objekt elektrische Potentiale derart zuzuführen, dass das Objekt relativ zu der Multi-Aperturplatte auf einem positiven elektrischen Potential liegt, so dass an dem Objekt erzeugte Sekundärelektronen die Öffnungen der Multi-Aperturplatte nicht durchsetzen.

11. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 9 oder 10, wobei die Multi-Aperturplatte drei voneinander isolierte leitfähige Schichten (411, 415, 419) umfasst, wobei das Spannungsversorgungssystem dazu konfiguriert ist, den drei leitfähigen Schichten jeweils einstellbare elektrische Potentiale zuzuführen.

12. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 11, ferner umfassend eine Vielzahl von Absorbern (405), welche, gesehen in Richtung der Objektebene (101), zwischen einander benachbarten Öffnungen (37) in der Multi-Aperturplatte (11)

angeordnet sind und welche, gesehen senkrecht zu der Objektebene, zwischen der Objektebene (101) und den Konvertern (403; 411; 413) angeordnet sind.

13. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 12, wobei die Absorber aus einem Material bestehen, welches aus Atomen besteht, die Kernladungszahlen aufweisen, welche im Mittel kleiner als 40, insbesondere kleiner als 20 und insbesondere kleiner als 15 sind.

14. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 12 oder 13, wobei das Vielstrahl-Teilchenmikroskop so konfiguriert ist, dass die Absorber während des Betriebs relativ zu den Konvertern positiv geladen sind.

15. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach Anspruch 14, wobei zwischen den Absorbern und den Konvertern während des Betriebs ein Potentialunterschied von mehr als 10 V, insbesondere mehr als 20 V und insbesondere mehr als 50 V besteht.

16. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei der erste Energieschwellwert größer als 50 eV und insbesondere größer als 200 eV ist.

17. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei der zweite Energieschwellwert kleiner als 200 eV und insbesondere kleiner als 100 eV ist.

18. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei die Anzahl der Primär-Teilchenstrahlen größer als 7 ist.

19. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei die Multi-Aperturplatte mit einem Abstand von der Objektebene angeordnet ist, der kleiner als 200 μm , insbesondere kleiner als 50 μm , insbesondere kleiner als 30 μm , insbesondere kleiner als 20 μm und insbesondere kleiner als 10 μm ist.

20. Vielstrahl-Teilchenmikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei ein minimaler Abstand von zwei einander benachbarten Primär-Teilchenstrahlen an der Multi-Aperturplatte kleiner als 50 μm , insbesondere kleiner als 30 μm , insbesondere kleiner als 20 μm und insbesondere kleiner als 12 μm ist.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

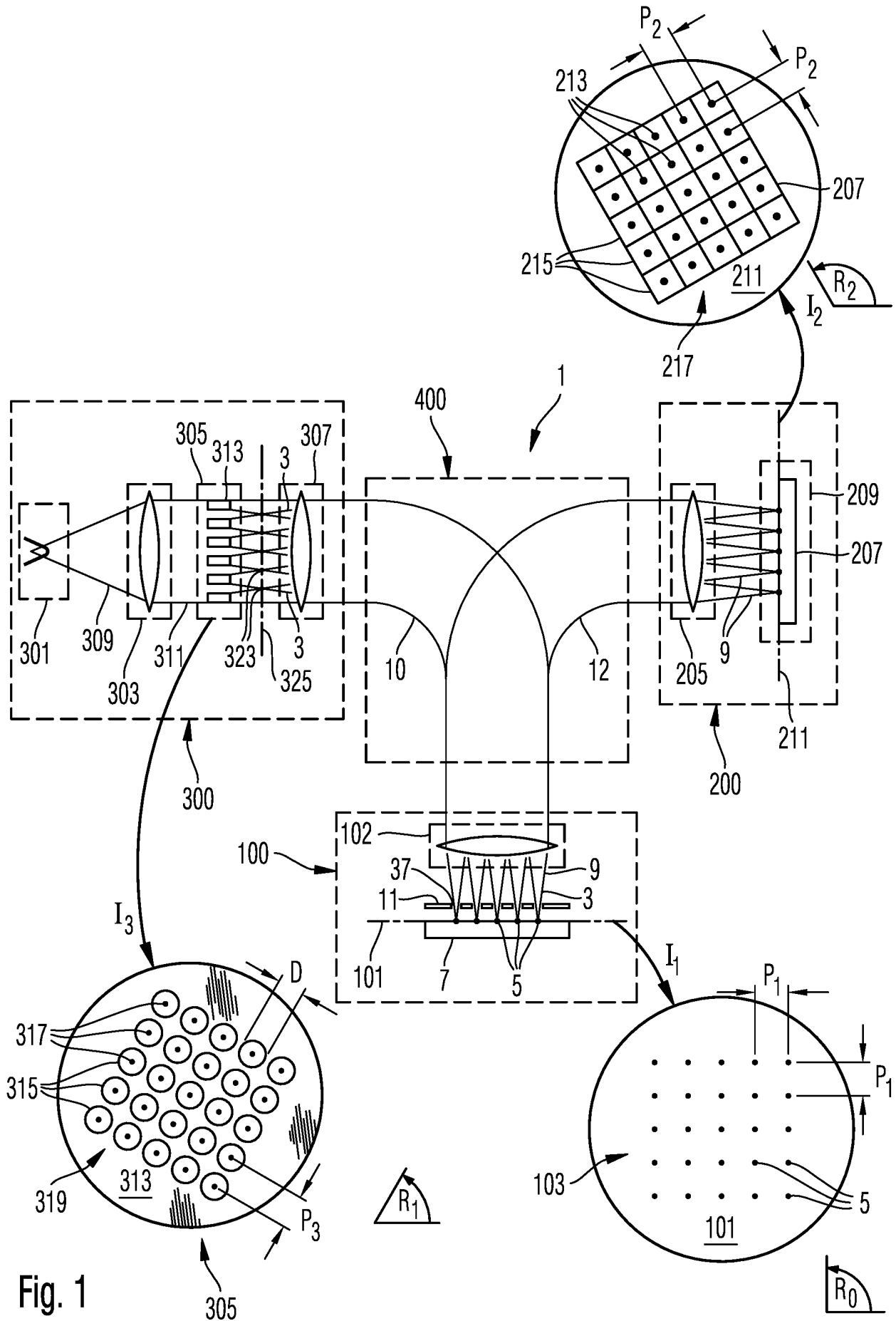


Fig. 1

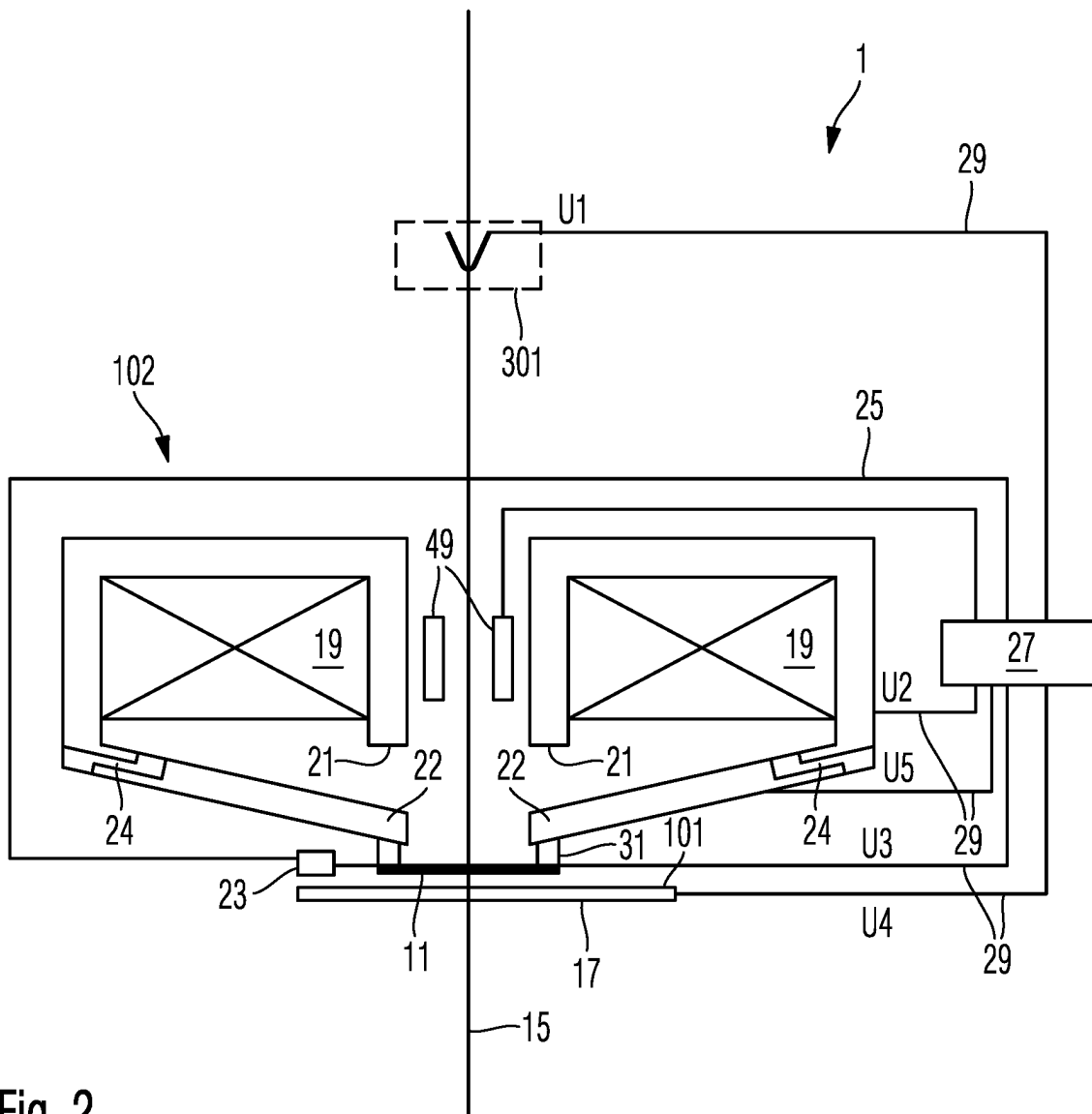


Fig. 2

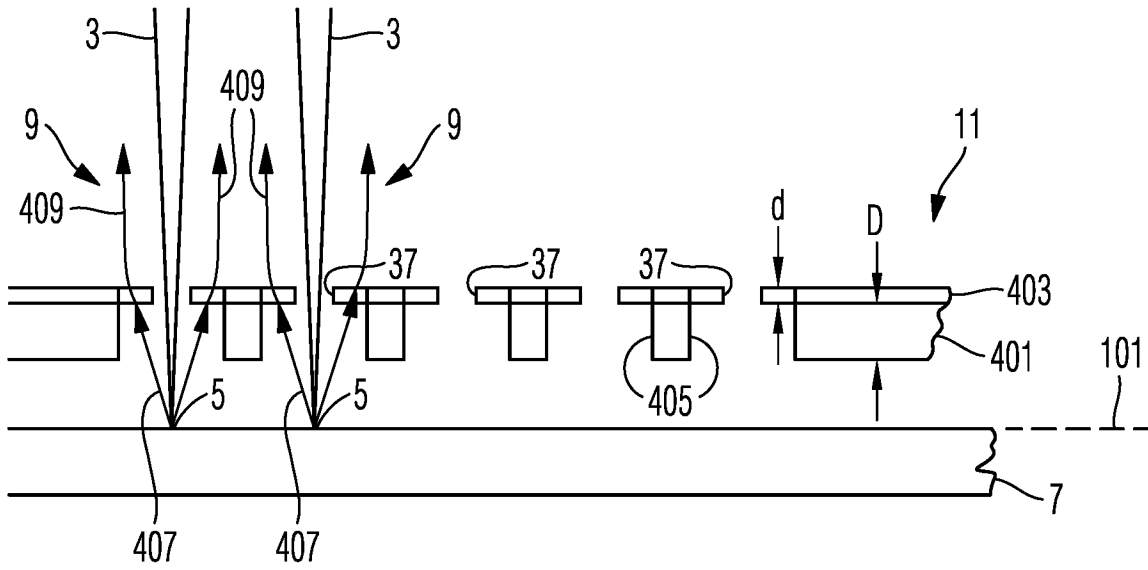


Fig. 3

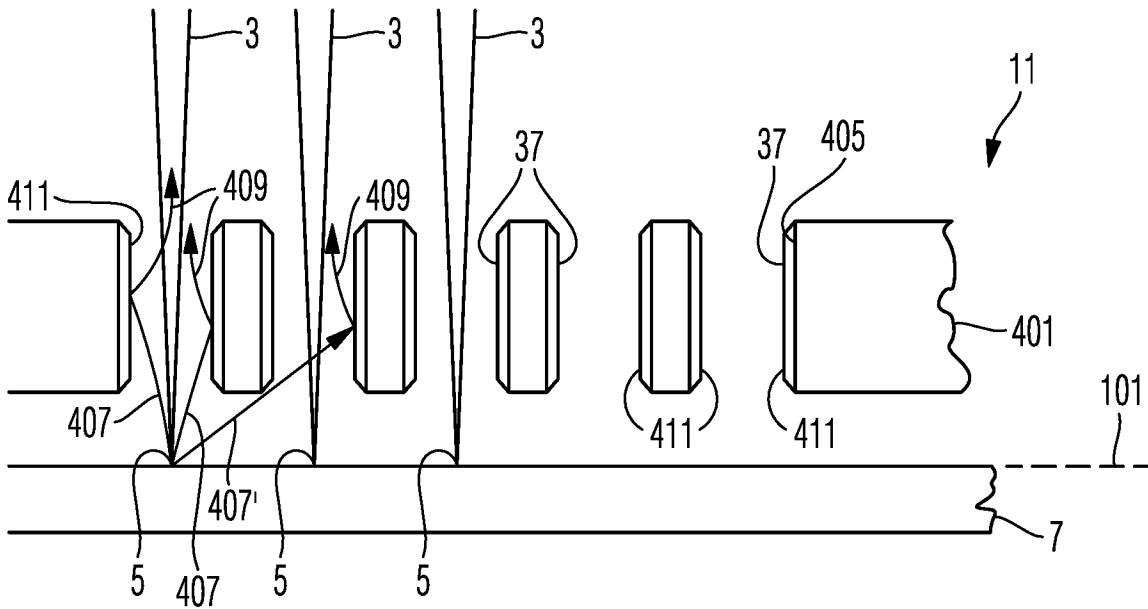


Fig. 4

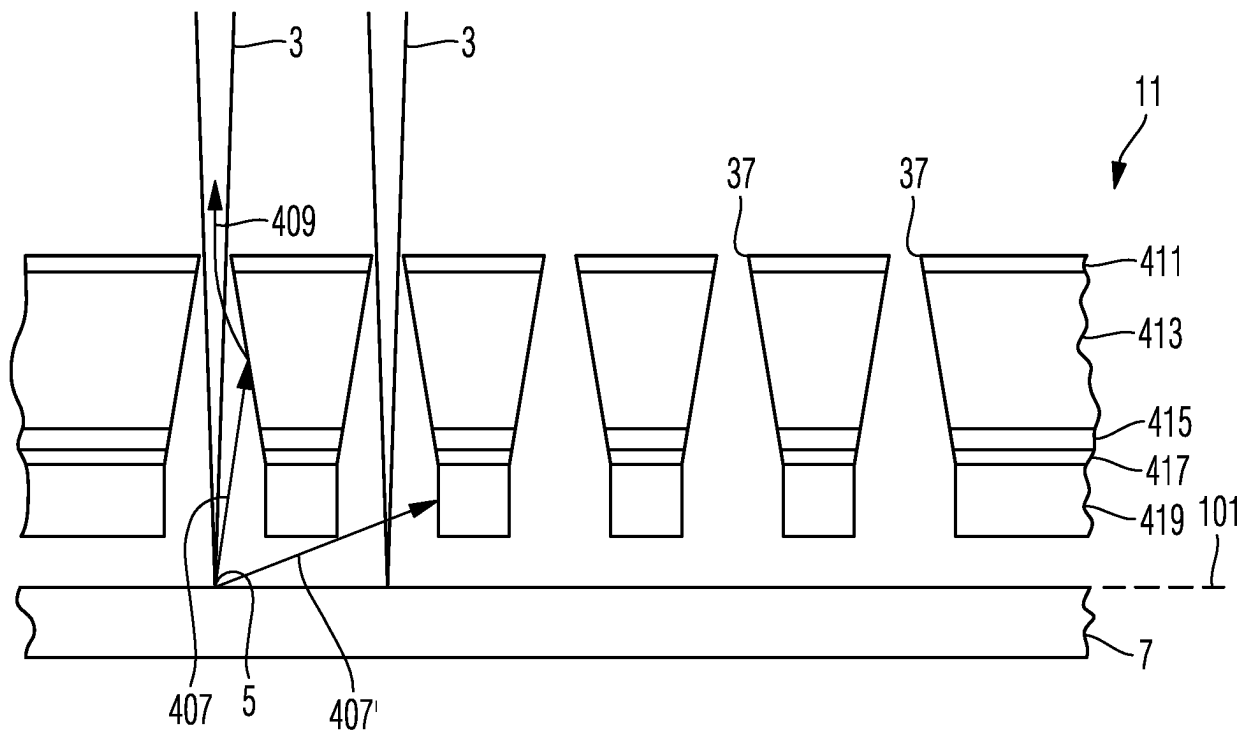


Fig. 5