



(10) **DE 10 2010 032 894 A1** 2012.02.02

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2010 032 894.4**

(22) Anmeldetag: **30.07.2010**

(43) Offenlegungstag: **02.02.2012**

(51) Int Cl.: **G01N 1/28** (2006.01)

G01N 1/44 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Carl Zeiss NTS GmbH, 73447, Oberkochen, DE;
Universität Ulm, 89081, Ulm, DE**

(74) Vertreter:

Diehl & Partner GbR, 80333, München, DE

(72) Erfinder:

**Lechner, Lorenz, 89075, Ulm, DE; Kaiser, Ute,
89073, Ulm, DE; Biskupek, Johannes, 89073, Ulm,
DE**

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

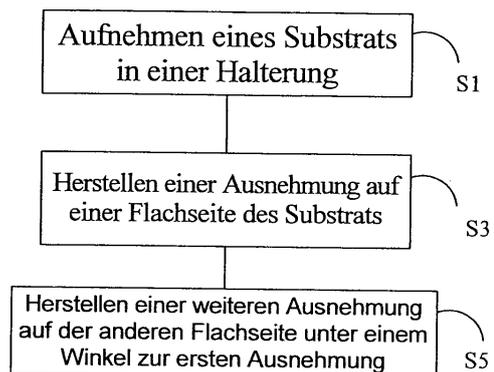
DE	102008052006	A1
DE	695 06 583	T2
US	2008/02 58 056	A1
US	2005/02 36 587	A1
US	2010/00 32 567	A1
US	41 28 765	A
JP	2003-1 66 918	A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Tem-Lamelle, Verfahren zu ihrer Herstellung und Vorrichtung zum Ausführen des Verfahrens**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zum Herstellen einer TEM-Lamelle umfasst das Aufnehmen (51) eines plattenförmigen Substrates mit einer Dicke in einer Halterung, das Herstellen (53) einer ersten streifenförmigen Ausnehmung auf einer ersten Seite des Substrats unter einem ersten Winkel zu der Halterung mittels eines Partikelstrahls, und das Herstellen (55) einer zweiten streifenförmigen Ausnehmung auf einer zweiten Seite des Substrats unter einem zweiten Winkel zu der Halterung mittels eines Partikelstrahls derart, dass die erste und die zweite streifenförmige Ausnehmung zueinander einen spitzen oder rechten Winkel bilden und zwischen sich einen Überlappungsbereich geringerer Dicke bilden. Die Lamelle weist einen dickeren Randbereich und dünneren Zentralbereich auf, mit einer ersten streifenförmigen Ausnehmung auf einer ersten Seite der Lamelle und einer zweiten streifenförmigen Ausnehmung auf einer zweiten Seite der Lamelle, wobei die erste und die zweite streifenförmige Ausnehmung zueinander einen spitzen oder rechten Winkel bilden und zwischen sich einen Überlappungsbereich mit einer Dicke unter 100 nm bilden. Eine Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens oder zur Herstellung der Lamelle umfasst eine um eine Querachse schwenkbare Lamellen-Halterung und eine zur Vertikalen gewinkelt angeordnete Längsachse, eine Vorrichtung zum Drehen um die Längsachse, und Anschlagmittel zum Begrenzen einer Verkippung der Lamellen-Halterung um die Querachse.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine für transmissions-elektronenmikroskopische Untersuchungen geeignete Materialprobe (TEM-"Lamelle"), insbesondere eine HRTEM-Lamelle (HR = high resolution), ein Verfahren zu ihrer Herstellung und eine Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens.

[0002] Die transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Analyse ist, unter anderem wegen ihrer Auflösung von bis unter 0,1 nm, eine der wichtigsten Analysenmethoden in der Halbleiterelektronik. Die Präparation geeigneter TEM-Proben ist jedoch kompliziert, da nur ultradünne Proben ("Lamellen") für die oben angesprochenen höchstauflösenden TEM-Analysenmethoden verwendet werden können. Besonders hat sich die Präparation mit fokussiertem Innenstrahl (focussed ion beam, FIB) bewährt, da auf diese Weise ortsgenau Querschnitte durch das zu inspizierende Substrat präpariert werden können.

[0003] Ein unveröffentlichtes Verfahren zur Präparation von TEM-Lamellen ist in der Patentanmeldung DE 10 2009 008 166 beschrieben, deren Offenbarungsgehalt durch Inbezugnahme vollumfänglich hierin aufgenommen wird. Dieser Anmeldung zu Folge wird ein Schutzstreifen auf der Substratoberfläche erzeugt und dann das Substratmaterial beidseits des Schutzstreifens mittels eines Ionenstrahls abgetragen. Eine Platte aus Substratmaterial bleibt zwischen den beiden auf diese Weise ausgebildeten Trögen stehen und kann dann an ihrer Peripherie vom restlichen Substrat getrennt und mittels eines Mikromanipulators aus dem Substrat gehoben werden, wobei sich die interessierenden Strukturen in der herausgehobenen Platte befinden. Ein ähnliches Verfahren zur Bereitstellung einer Materialplatte von 5–100 nm Dicke ist aus der Offenlegungsschrift DE 103 44 643 A1 bekannt.

[0004] Zur hochauflösenden Analyse sind diese im Wesentlichen quaderförmigen Materialplatten jedoch entweder zu dick oder aber zu fragil. In der Patentschrift US 7,002,152 wird eine Präparationsmethode für eine bereichsweise nachgedünnte Materialprobe für hochauflösende elektronenmikroskopische Untersuchungen beschrieben.

[0005] Dieses herkömmliche Verfahren wird als unbefriedigend hinsichtlich der Qualität der erhaltenen Materialproben (Lamellen) insbesondere für die hochauflösende Elektronenmikroskopie empfunden.

[0006] Die Erfindung geht davon aus, dass für solche Anwendungen präzise gefertigte Lamellenflächen vorteilhaft sind.

[0007] Das bekannte Verfahren erzeugt einerseits keine hinreichend exakt planen Flächen, und andererseits

neigen die erzeugten Flächen zur Verformung nach der Herstellung. Eine Ursache hierfür haben die Erfinder darin erkannt, dass beim herkömmlichen Verfahren der Probenrand geschwächt wird. Aus diesem Grund können vorhandene Spannungen dünne Materialproben verbiegen.

[0008] Die Erfindung setzt sich zum Ziel, eine bessere Probe, ein verbessertes Verfahren zu ihrer Herstellung und eine Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens bereitzustellen.

[0009] Diese Aufgabe wird gelöst durch eine Probe, die auf ihren beiden Seiten zueinander gewinkelt angeordnete streifenförmige Ausnehmungen aufweist, zwischen denen ein Überlappungsbereich minderer Dicke besteht. Diese Ausnehmungen können präzise und stabil gefertigt werden.

[0010] Das Verfahren zur Herstellung beinhaltet das Herstellen der beiden zueinander gewinkelt angeordneten Ausnehmungen mit einem Partikelstrahl. Damit wird die gewünschte Präzision erreicht. Hierbei wird unter "gewinkelt" eine relative Ausrichtung verstanden, bei der die Längsrichtungen der Ausnehmungen in ihrer Projektion auf die Lamelle einen Winkel von mindestens 1° bzw. höchstens 179° einschließen, in Ausführungsformen von minimal 45° bzw. maximal 135°.

[0011] Die Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens oder zur Herstellung der Probe weist eine um eine Querachse schwenkbare Lamellen-Halterung auf, eine Vorrichtung zum Drehen der Halterung um eine Längsachse und einen Anschlag zum Begrenzen einer Verkipfung der Halterung um die Querachse. Diese Vorrichtung gewährleistet eine präzise Ausrichtung des Substrats in Bezug auf den Partikelstrahl.

[0012] In Ausführungsformen wird zum Herstellen der Ausnehmungen ein geneigt auf das Substrat auftreffender Innenstrahl verwendet. In weiteren Ausführungsformen werden die Ausnehmungen jeweils durchgehend von einem Rand des Substrats in Richtung zum gegenüberliegenden Rand hergestellt, und zwar in Ausführungsformen zwischen verschiedenen Ränderpaaren. Es ist aber auch möglich, die Ausnehmungen einander entgegengesetzt schräg zu denselben Rändern herzustellen.

[0013] In Ausführungsformen wird die Halterung zwischen dem Herstellen der ersten Ausnehmung und dem Herstellen der zweiten Ausnehmung gedreht. In noch weiteren Ausführungsformen wird bei diesem Schritt die Halterung verkippt. So kann der Verkipfungsschritt passiv ausgeführt werden, z. B. indem die Drehachse der Halterung gewinkelt zur Vertikalen angeordnet ist. Damit kann die Verkipfung beson-

ders einfach, reproduzierbar und wenig fehleranfällig ausgeführt werden.

[0014] Die Probe weist in Ausführungsformen einen Randbereich auf, der überall dicker ist als ein vom Randbereich umschlossener Zentralbereich. Dadurch wird die Stabilität des Zentralbereichs in besonderem Maße gewährleistet.

[0015] Die Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens bzw. zur Herstellung der Probe weist in Ausführungsformen eine um eine Querachse drehbare Lamellen-Halterung sowie einen Anschlag für eine Begrenzung der Verkippung der Lamellen-Halterung um die Querachse auf. Um ihre Längsachse ist die Halterung in Ausführungsformen mittels einer Vorrichtung drehbar, wobei die Längsachse zur Vertikalen geneigt ist. In Ausführungsformen ist ein Schwerkraft-Zahnstangenantrieb vorgesehen, oder ein Massenschwerpunkt der Lamellen-Halterung befindet sich abseits der Querachse. Dadurch kann durch Drehen um die zur Vertikalen geneigte Längsachse erreicht werden, dass die Halterung in die entgegengesetzte Schwenklage kippt. Ferner ist in Ausführungsformen eine Partikelstrahlquelle und -führung vorgesehen, zweckmäßigerweise eine Ionenstrahlquelle und -führung. Zusätzlich kann eine Elektronenstrahlquelle und -führung vorgesehen sein, um damit die präparierte Lamelle zu untersuchen. Die Ionen- bzw. Elektronenstrahlführungen stellen zueinander gewinkelt ausgerichtete Strahlen bereit. Zweckmäßigerweise steht die Richtung der Querachse in etwa senkrecht auf der Oberflächenebene der gehalterten Lamelle.

[0016] Ausführungsformen werden nachfolgend anhand von Figuren näher erläutert.

[0017] **Fig. 1** ein zeigt herkömmliches Ionenstrahl-Bearbeitungssystem mit Elektronenstrahlsystem;

[0018] **Fig. 2a** zeigt eine erfindungsgemäße Lamellen Halterung;

[0019] **Fig. 2b** zeigt eine bekannte Struktur zur Befestigung der Materialprobe an der Lamellen-Halterung;

[0020] **Fig. 3a–c** zeigen eine beispielhafte TEM-Lamelle im Aufriss, in der Seitenansicht und perspektivisch;

[0021] **Fig. 4** zeigt eine andere beispielhafte TEM-Lamelle perspektivisch;

[0022] **Fig. 5a, b** zeigen eine andere beispielhafte TEM-Lamelle im Aufriss und perspektivisch;

[0023] **Fig. 6** zeigt eine andere beispielhafte TEM-Lamelle im Aufriss;

[0024] **Fig. 7a–c** zeigen eine andere erfindungsgemäße Lamellen-Halterung mit einem Rotations-Translations-Wandler in Auf- und Seitenansichten;

[0025] **Fig. 8** zeigt eine Detailansicht des Wandlers;

[0026] **Fig. 9** zeigt eine andere Anordnung der Lamellen-Halterung; und

[0027] **Fig. 10** zeigt ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0028] **Fig. 1** zeigt in perspektivischer und schematisch vereinfachter Darstellung eine teilchenoptische Anordnung **1** zur Erläuterung von Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung. Die teilchenoptische Anordnung umfasst ein Elektronenmikroskopiesystem **3** mit einer Hauptachse **5** und ein Ionenstrahlbearbeitungssystem **7** mit einer Hauptachse **9**. Die Hauptachsen **5** und **9** des Elektronenmikroskopiesystems **3** bzw. des Ionenstrahlbearbeitungssystems **7** schneiden sich an einem Ort **11** unter einem Winkel α , welcher Werte von beispielsweise 45° bis 55° aufweisen kann, so dass ein zu untersuchendes Objekt **13** mit einer Oberfläche **15** in einem Bereich des Ortes **11** sowohl mit einem entlang der Hauptachse **9** des Ionenstrahlbearbeitungssystems **7** emittierten Innenstrahl **17** bearbeitet als auch mit einem entlang der Hauptachse **5** des Elektronenmikroskopiesystems **3** emittierten Elektronenstrahl **19** untersucht werden kann. Zur Halterung des Objekts ist eine schematisch angedeutete Halterung **16**, vorgesehen, welche das Objekt **13** im Hinblick auf Abstand von und Orientierung zu dem Elektronenmikroskopiesystem einstellen kann.

[0029] Hierzu umfasst das Elektronenmikroskopiesystem **3** zur Erzeugung des Primärelektronenstrahls **19** eine Elektronenquelle **21**, welche schematisch durch eine Kathode **23** und eine Anode **27** sowie einer hierzwischen angeordneten Suppressorelektrode **25** und einer mit Abstand hiervon angeordneten Extraktorelektrode **26** dargestellt ist. Weiter umfasst das Elektronenmikroskopiesystem **3** eine Beschleunigungselektrode **27**, welche in ein Strahlrohr **29** übergeht und eine Kollimatoranordnung **31** durchsetzt, welche schematisch durch eine Ringspule **33** und ein Joch **35** dargestellt ist. Nach dem Durchlaufen der Kollimatoranordnung **31** durchsetzt der Primärelektronenstrahl eine Lochblende **37** und ein zentrales Loch **39** in einem Sekundärelektronendetektor **41**, woraufhin der Primärelektronenstrahl **19** in eine Objektivlinse **43** des Elektronenmikroskopiesystems **3** eintritt. Die Objektivlinse **43** umfasst zur Fokussierung des Primärelektronenstrahls **19** eine Magnetlinse **45** und eine elektrostatische Linse **47**. Die Magnetlinse **45** umfasst in der schematischen Darstellung der **Fig. 1** eine Ringspule **49**, einen inneren Polschuh **51** und einen äußeren Polschuh **53**. Die elektrostatische Linse **47** ist durch ein unteres Ende **55** des

Strahlrohrs **29**, das innere untere Ende des äußeren Polschuhs **53** sowie eine konisch sich hin zur Position **11** an der Probe sich verjüngende Ringelektrode **59** gebildet. Die Objektivlinse **43**, welche in [Fig. 1](#) schematisch dargestellt ist, kann einen Aufbau aufweisen, wie er in US 6,855,938 detaillierter dargestellt ist.

[0030] Das Ionenstrahlbearbeitungssystem **7** umfasst eine Ionenquelle **63** mit Extraktionselektrode **65**, einen Kollimator **67**, eine variable Blende **69**, Ablenkelektroden **71** und Fokussierlinsen **73** zur Erzeugung des aus einem Gehäuse **75** des Ionenstrahlbearbeitungssystems **7** austretenden Ionenstrahls **17**. Die Längsachse **9'** der Halterung **16** ist um einen Winkel zur Vertikalen **5'** geneigt, der in diesem Beispiel dem Winkel α zwischen den Richtungen **5** und **9** der Partikelstrahlen entspricht. Die Richtungen **5'** und **9'** müssen aber nicht mit den Richtungen **5** und **9** der Partikelstrahlen koinzidieren, und auch der von ihnen eingeschlossene Winkel muss nicht mit dem Winkel α zwischen den Partikelstrahlen übereinstimmen.

[0031] In [Fig. 2a](#) ist eine erfindungsgemäße Lamellen-Halterung **77** dargestellt. Eine oder mehrere solcher Lamellen-Halterungen **77** können an der Halterung **16** von [Fig. 1](#) mittels Einsätzen **83** befestigt sein, oder können jene ersetzen. Die Lamellen-Halterung **77** ist um eine zu ihrer Längsachse parallele Achse schwenkbar, z. B. indem die Halterung **16** um ihre eigene Längsachse **91** drehbar ausgebildet ist.

[0032] Die Lamellen-Halterung **77** weist eine quer angeordnete Schwenkachse **85** auf, die mit einem gewissen Abstand vom Massenschwerpunkt **79** der Lamellen-Halterung **77** angeordnet ist. Die Schwenkachse **85** steht geneigt, also unter einem von 0° und 180° (z. B. um mindestens 5°) verschiedenen Winkel zur Längsachse der Lamellen-Halterung, in Ausführungsformen senkrecht oder nahezu (z. B. $\pm 10^\circ$ oder $\pm 5^\circ$) senkrecht zu dieser Längsachse. An dem schwenkbar angelenkten Teil **81** der Lamellen-Halterung **77** ist die eigentliche Lamellen-Aufnahme **87** zur Befestigung der Lamelle **100** angeordnet. An der Seite der Lamellen-Halterung **77**, die der Lamellen-Aufnahme **87** abgewandt ist, sind zu beiden Seiten der Querachse **85** Anschläge **89** positioniert, die die Verkippung der Lamellen-Halterung **77** um die Querschwenkachse **85** begrenzen. Die Anschläge **89** können flächig oder punktuell ausgebildet sein. Im dargestellten Beispiel sind die Anschläge **89** als um 90° zueinander und um je 45° zur Längsachse **91** geneigte Anschlagflächen gebildet. An der Lamellen-Aufnahme **87** wird eine in [Fig. 2b](#) im Detail gezeigte Hilfsstruktur befestigt und an dieser Hilfsstruktur die eigentlichen Materialprobe. Solche Hilfsstrukturen sind als Omniprobe® Lift-Out Grids von Ted Pella, Inc., Redding CA, USA, kommerziell erhältlich. Solche und ähnliche Hilfsstrukturen z. B. gemäß der obengenannten Offenlegungsschrift DE 103 44 643 A1 weisen einerseits einen großflächigen Blattbereich **201**

aus z. B. Kupfer, Molybdän oder molybdänbeschichtetem Kupfer auf, an dem sie mit gewöhnlichen Manipulatoren (z. B. Pinzetten) gefasst und an der Lamellen-Aufnahme **87** befestigt werden können, und andererseits einen oder mehrere filigrane Fortsätze, an denen die vergleichsweise winzige Materialprobe (z. B. per Adhäsion) gehalten werden kann. Das in [Fig. 2b](#) gezeigte Beispiel weist zwei breitere **203'** und dazwischen einen schmalen **203''** solcher Fortsätze ("posts") auf.

[0033] Bei der Herstellung der Lamelle **100** (siehe dazu [Fig. 3a](#) bis [Fig. 3c](#)) wird ein Innenstrahl (angedeutet durch einen Pfeil I_1) beispielsweise unter einem flachen Winkel von 1° bis 3° zur Oberfläche auf die eine Flachseite **101** des Substrats gestrahlt und das Substratmaterial in einem Streifen von beispielsweise $1\text{--}5\ \mu\text{m}$ Breite B und einer Tiefe T von knapp der halben Substratdicke D abgetragen. Im dargestellten Beispiel wird die Ausnehmung **102** über die gesamte Substratlänge hergestellt; in anderen Ausführungen wird der Abtragungsprozess gestoppt, bevor die Längsausdehnung der Ausnehmung **102** den Rand **106** des Substrats an der gegenüberliegenden Seite erreicht. Dort kann z. B. eine Lamellen-Schutzschicht **108** angeordnet sein. Nach Fertigstellen der ersten Ausnehmung **102** wird die Halterung **16** zusammen mit dem Einsatz **83** der Lamellen-Halterung **77** gedreht. Da ihre Längsachse **91** zur Vertikalen geneigt ist, kippt die Lamellen-Halterung **77** bei einer bestimmten Drehlage (nämlich wenn die Querachse **85** in einer vertikalen Ebene angeordnet ist) in die entgegengesetzte Schwenklage und schwenkt somit das gehaltene Substrat **100** so, dass dieses der Ionenstrahlquelle die andere Flachseite **103** darbietet, und zwar in anderer Winkel-Ausrichtung. Sodann wird auf der anderen Flachseite **103** des Substrats eine zweite streifenförmige Ausnehmung **104** in ähnlicher Weise wie die erste hergestellt. Wegen der Verkippung der Lamellen-Halterung **77** zwischen den beiden Bearbeitungsschritten braucht die Führung des Ionenstrahls nicht geändert zu werden; dennoch wird die rückseitige Ausnehmung **104** in einem Winkel W zu der vorderseitigen Ausnehmung **102** erzeugt. In der Ausführungsform der [Fig. 5a](#) und [Fig. 5b](#) wird die eine Ausnehmung **102b** in etwa parallel zu einer vorhandenen Lamellen-Schutzschicht **108b** hergestellt, und die andere **104b** in etwa senkrecht dazu (also unter einem rechten Winkel W), und damit zwischen den von der ersten Ausnehmung **102b** nicht durchsetzten Substraträndern **106b**. In anderen Ausführungsformen (gemäß [Fig. 4](#)) werden beide Ausnehmungen **102a**, **104a** zwischen denselben Substraträndern **106a** hergestellt, aber unter einander entgegengesetzten, betragsmäßig nicht notwendig, aber zweckmäßig gleichen Winkeln S schräg dazu. Der minimale Wert für den Kantenwinkel S , und damit der maximale Wert für den Schnittwinkel W ergibt sich aus dem Verhältnis von Breite H zu Länge L des Substrats **100** unter Berücksichtigung der

Breite B der Ausnehmung. In dieser Ausführungsform wird ein annähernd rechter Winkel W zwischen den beiden Ausnehmungen **102a** und **104a** erreicht, so dass ein nahezu quadratischer, relativ großflächiger Zentralbereich A resultiert. Wie besonders in [Fig. 3b](#) erkennbar, ist der Randbereich R in den dargestellten Ausführungsformen mit gleich tiefen Ausnehmungen **102**, **104** überall mindestens halb so dick wie das Substrat.

[0034] In der weiteren Ausführungsform gemäß [Fig. 6](#) sind auf einer Seite der Probe mehrere parallele Ausnehmungen **102c'**, **102c''** dargestellt, deren eine sich bis in die Schutzschicht **108c** an der vormaligen Waferoberfläche erstreckt. Somit kann eine sehr waferoberflächennahe Struktur untersucht werden. Zusammen mit der Ausnehmung **104c** auf der gegenüberliegenden Flachseite werden in diesem Beispiel zwei voneinander beabstandete, auf eine oder verschiedene für TEM-Zwecke brauchbare Dicken gedünnte Zentralbereiche A' und A'' gebildet. Dadurch bleibt mittig ein Streifen **105** und somit mehr des die Probe versteifenden Substratmaterials stehen, als wenn nur eine einzige, entsprechend breitere Ausnehmung angefertigt würde. Zudem wird die Innenstrahl-Betriebszeit für die Entfernung des Streifens **105** gespart.

[0035] Allgemein können die Materialproben äußere Abmessungen von minimal $5\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m} \times 0,1\ \mu\text{m}$ (Breite H \times Länge L \times Dicke D) bis maximal $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm} \times 0,5\ \text{mm}$ aufweisen, wobei in Ausführungsformen Bereiche von $10\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$ für die Breite H, $15\ \mu\text{m}$ bis $30\ \mu\text{m}$ für die Länge L und $1\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ für die Dicke D typisch sind. Davon unabhängig können die Materialproben auch von der Quader-Plattenform abweichen und beispielsweise von einem Randbereich zum gegenüberliegenden Randbereich in der Dicke variieren, also etwa einen Keil bilden. Die streifenförmigen vorder- bzw. rückseitigen Ausnehmungen laufen zweckmäßigerweise dennoch in der Tiefenrichtung nicht geneigt zueinander, so dass der Zentralbereich eine gleichmäßige Dicke aufweist.

[0036] In einer anderen Ausführungsformen der Lamellen-Halterung nach [Fig. 7a–c](#) wird die Schwenkbewegung der Lamelle unter Ausnutzung der Schwerkraftwirkung auf ein linear (entlang des eingezeichneten Doppelpfeils P) verschieblich gelagertes Antriebs-Element (Schlitten **111**) ausgeführt, das mittels einer Zahnstange **112** in formschlüssigem (alternativ kraftschlüssigem) Eingriff mit einem Zahnrad oder einem Zahnsektor **113** steht, welches bzw. welcher seinerseits über eine Welle **115** mit der Lamellen-Halterung **117** verbunden ist. Durch Drehen der Halterung **16** um die (im Betrieb zur Vertikalen geneigten) Längsachse z wird die Verschiebeführung **119** des Antriebs-Schlittens **111** in eine waagerechte Lage und weiter in eine entgegengesetzt geneig-

te Lage gedreht. Die wegen der Schwerkraftwirkung folgende laterale Bewegung des Schlittens **111** bewirkt seinerseits mittels der Welle **115** des Zahnstangen-Antriebs eine Winkelverstellung der Lamellen-Halterung **117**. So kann das gehaltete Substrat **121** in die gewünschte Ausrichtung relativ zum Innenstrahl zur Bearbeitung seiner Oberfläche bewegt werden. Bei dieser Variante sind die kippenden Teile kleiner. Die Halterung **16** weist in diesem Beispiel eine Führung **119** für das verschiebliche Antriebs-Element **111** auf; nötigenfalls kann eine Feststoffschmierung mit z. B. Graphit erfolgen oder eine reibungsarme Teflonschicht an der Oberfläche des Schlittens **111** und/oder in der Führung **119** vorgesehen sein. Das Ausmaß der Lateral-Bewegung wird durch Anschlag-Blöcke **123** begrenzt. Ebenfalls dargestellt sind Lager **125** für die Welle **115**, sowie die Lage der Achsen x und y. Hierbei ist die Welle **115** parallel zur Querachse y. Die Lamelle **121** selbst ist in diesem Beispiel so gehalten, dass die Schwenkachse senkrecht auf ihrer Ebene steht. Im Betrieb wird die Lamelle **121** in einer Entfernung von etwa 4–6 mm von der Elektronen-Objektivlinse gehalten. Der Schwenkaufbau ist zweckmäßig von der Grundfläche der Halterung **16** in der Mitte gemessen höchstens 10–20 mm hoch, und abseits davon niedriger, damit die Lamellen-Halterung **117** nicht die Drehmöglichkeit der Halterung **16** einschränkt. In einer Variante geschieht die Schwenkung nicht oder nicht allein passiv durch Ausnutzung der Schwerkraftwirkung, sondern es ist ein weiterer, beispielsweise elektromechanischer Aktuator vorgesehen, der die Schwenkung auf ein Auslösesignal hin durchführt oder unterstützt.

[0037] In der [Fig. 8](#) ist eine Ausführung des beispielhaften Zahnstangentriebs dargestellt, jedoch zur besseren Übersichtlichkeit ohne Lager. Die Zahnstange **112** ist auf dem in Richtung des Doppelpfeils verschieblichen Schlitten **111** befestigt und steht im Eingriff mit einem Zahnsektor **113**. Dessen Abtriebswelle **115** ist mit der Lamellen-Halterung **117** verbunden, und zwar in dieser Ausführung derart, dass der Masseschwerpunkt **129** der Lamellen-Halterung **117** nahe der Drehachse w der Welle **115** liegt, was das Trägheitsmoment reduziert.

[0038] In der [Fig. 9](#) ist eine andere Variante der Anordnung der Lamellen-Halterung **117e** dargestellt, bei der die gehaltete Materialprobe selbst nahe der Verlängerung der Drehachse w der Welle **115e** liegt. In dieser Anordnung verlagert sich die gehaltete Probe minimal lateral, wenn sie geschwenkt wird. Dadurch vereinfacht sich die Justage der Partikelstrahlen. Die Welle **115e** weist einen gekröpften Endbereich **131** auf, an dem die Lamellen-Halterung **117e** angebracht ist, wobei die Kröpfung K ein solches Maß hat, dass die Größe der Halterung **117e** kompensiert wird. In diesem Beispiel ist die Lamellen-Halterung **117e** jenseits des Lagerbocks **125e** angeordnet, da-

mit die Partikelstrahlen möglichst ungehindert zu der gehaltenen Materialprobe gelangen können.

[0039] Die hergestellte Lamelle weist in ihrem Zentralbereich A, wo sich die beiden Ausnehmungen in ihrer Projektion auf die Lamellenebene überlappen, eine sehr geringe Dicke von 100 nm oder weniger auf; auch unter 20 nm und bis zu 4 nm sind erreichbar, indem jede der Ausnehmungen eine Tiefe von zwischen der halben Substratdicke und 10 nm bzw. 2 nm weniger aufweist. Allerdings sind die Tiefen in anderen Ausführungsformen voneinander verschieden (asymmetrisch), wobei ihre Summe um 4 bis 20 nm oder bis zu 100 nm geringer ist als die Substratdicke. Im Randbereich braucht die Dicke des Substrats an keiner Stelle um die Hälfte vermindert zu werden (außer bei asymmetrischen Ausnehmungen). In den in den [Fig. 3a–c](#), [Fig. 4](#), [Fig. 5a](#), b und [Fig. 6](#) dargestellten Ausführungsformen bleibt jeweils ein durchgängiger Rand stehen, der überall mindestens die halbe Substratdicke aufweist, wohingegen im Zentrumsbereich ein äußerst dünner Bereich A, A' bzw. A" gebildet wird, der mit dem bereitgestellten Elektronenstrahlensystem zu Untersuchungszwecken durchleuchtet werden kann. Der Winkel, den die beiden Ausnehmungen in ihrer Projektion auf die Lamellenebene miteinander bilden, beträgt in den dargestellten Beispielen etwa 60° bzw. etwa 90°. Es ist zweckmäßig, diesen Winkel auf mindestens 30° oder 45° bzw. maximal 150° oder 135° (Supplementwinkel) einzustellen, weil sonst der Überlappungsbereich der beiden Ausnehmungen sehr schmal gerät. In den dargestellten Fällen ist die Breite jeder der Ausnehmungen etwa 2–3 µm; generell sind 1 bis 5 µm zweckmäßig. Bei 90° Überlappungswinkel (also senkrechter Anordnung) der Ausnehmungen resultiert ein Durchleuchtungsareal von 1 bis 25 µm² oder 4–9 µm² ([Fig. 4](#), [Fig. 5a–b](#)). Bei den ersten der dargestellten Lamellen gemäß den [Fig. 3a–c](#) und [Fig. 4](#) verlaufen die beiden Ausnehmungen zwischen demselben Ränderpaar, und bei den letzten gemäß [Fig. 5a](#), b und [Fig. 6](#) zwischen verschiedenen. Im ersten Fall ist gemäß [Fig. 3a](#) der Winkel W der Überlappung ein spitzer. Bei einem rechteckigen Substrat kann aber auch ein rechter Winkel W erreicht werden, wenn beide Ausnehmungen zwischen den längeren Seitenkanten des Rechtecks verlaufen ([Fig. 4](#)). Im anderen dargestellten Fall ([Fig. 5a](#), [Fig. 6](#)) ist der Winkel W ein rechter; es kann aber bei Bedarf auch ein spitzer Winkel W erreicht werden, indem zumindest eine der Ausnehmungen schräg zum Rand des Substrates hergestellt wird. Durch die Führung einer der Ausnehmungen parallel zur ursprünglich äußeren Seitenkante des Substrats kann direkt unter der Schutzschicht ein Beobachtungsfenster angeordnet werden ([Fig. 6](#)), um dort angeordnete Strukturen zu inspizieren. In den dargestellten Ausführungen sind jeweils beide Ausnehmungen durchgehend von Rand zu Rand ausgeführt. Allerdings reicht es aus, die Ausnehmungen jeweils von einem Rand bis einschließ-

lich des Untersuchungsbereichs A anzufertigen, so dass der Substratrandbereich R insgesamt noch weniger geschwächt wird und noch mehr Ionenstrahl-Betriebszeit eingespart wird.

[0040] In [Fig. 10](#) ist eine Ausführungsform des Verfahrens dargestellt: Zunächst wird das plattenförmige Lamellensubstrat in einer Halterung aufgenommen (S1), auf einer Flachseite eine streifenförmige Ausnehmung hergestellt (S3), und dann auf der anderen Flachseite eine zweite streifenförmige Ausnehmung derart hergestellt (S5), dass die Ausnehmungen in ihrer Projektion auf die Lamellenebene einen spitzen oder rechten Winkel einschließen und zwischen ihnen ein Überlappungsbereich von unter 100 nm Dicke gebildet wird.

[0041] Dieses Verfahren ist für die Zielpräparation besonders geeignet, da sich die Probe während des Dünnens elektronenmikroskopisch beobachten lässt und die Präparation somit unter visueller Kontrolle stattfinden kann. Der Nutzer muss sich deshalb nicht darauf verlassen, dass die gerade interessierende Struktur (region of interest, ROI) sich exakt in der Probenmitte befindet. Dies sicher zu stellen, wäre aber bei den durch die Lamellendicke vorgegebenen Toleranzen (< 5 nm) nur schwer möglich. Vielmehr kann der Dünnungsprozess in Ausführungsformen gestoppt werden, wenn die tiefste Stelle der gerade hergestellten Ausnehmung in die Nähe der interessierenden Struktur (z. B. innerhalb 5 nm davon) gelangt, und die zweite Ausnehmung auf der gegenüberliegenden Seite entsprechend tiefer hergestellt werden.

[0042] Die Erfindung wurde vorstehend an Hand von Beispielen erläutert. Der Fachmann wird erkennen, dass die Erfindung dadurch nicht limitiert ist, sondern allein durch die beigefügten Ansprüche.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- DE 102009008166 [0003]
- DE 10344643 A1 [0003, 0032]
- US 7002152 [0004]
- US 6855938 [0029]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer Materialprobe für transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen, das Verfahren umfassend:

Aufnehmen eines Substrates mit einer Dicke in einer Halterung;

Herstellen mittels eines Partikelstrahls einer ersten streifenförmigen Ausnehmung auf einer ersten Seite des Substrats unter einem ersten Winkel einer Längsrichtung der ersten streifenförmigen Ausnehmung zu der Halterung; und

Herstellen mittels eines Partikelstrahls einer zweiten streifenförmigen Ausnehmung auf einer zweiten Seite des Substrats unter einem zweiten Winkel einer Längsrichtung der zweiten streifenförmigen Ausnehmung zu der Halterung derart, dass die Längsrichtungen der ersten und der zweiten streifenförmigen Ausnehmung zueinander einen spitzen oder rechten Winkel bilden und die erste und die zweite Ausnehmung zwischen sich einen Überlappungsbereich geringerer Dicke bilden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei zum Herstellen der Ausnehmungen ein zu einer Plattenebene des Substrates geneigt auftreffender fokussierter Innenstrahl verwendet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die erste Ausnehmung von einem Rand des Substrats bis zu einem zweiten, dem ersten Rand gegenüberliegenden Rand des Substrats durchgängig hergestellt wird, und die zweite Ausnehmung von einem dritten Rand des Substrats bis zu einem vierten, dem dritten Rand gegenüberliegenden Rand des Substrats durchgängig hergestellt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Halterung zwischen dem Herstellen der ersten Ausnehmung und dem Herstellen der zweiten Ausnehmung um eine Achse senkrecht oder quer zur Plattenebene gekippt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Halterung zwischen dem Herstellen der ersten Ausnehmung und dem Herstellen der zweiten Ausnehmung um eine zur Plattenebene schräg oder parallel liegende Achse gedreht wird, wobei die Drehachse gegebenenfalls zur Kippachse geneigt oder senkrecht ist.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, wobei zum Herstellen der beiden Ausnehmungen der Partikelstrahl in derselben räumlichen Ausrichtung verwendet wird.

7. Plattenförmige Materialprobe mit dickerem Randbereich und wenigstens einem dünneren Zentralbereich, mit wenigstens einer ersten streifenförmigen Ausnehmung auf einer ersten Flachseite der Ma-

terialprobe und einer zweiten streifenförmigen Ausnehmung auf einer zweiten Flachseite der Materialprobe, wobei die wenigstens eine erste und die zweite streifenförmige Ausnehmung in Projektion auf die Flachseiten zueinander einen spitzen oder rechten Winkel bilden und zwischen sich einen Überlappungsbereich mit einer Dicke unter 100 nm bilden.

8. Materialprobe nach Anspruch 7, wobei der Randbereich überall dicker ist als der Zentralbereich.

9. Vorrichtung zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6 und/oder zur Herstellung der Materialprobe nach Anspruch 7 oder 8, umfassend:

eine um eine Querachse schwenkbare Lamellen-Halterung;

eine Drehvorrichtung zum Drehen der Lamellen-Halterung um eine zur Querachse geneigt stehende Längsachse, wobei die Längsachse insbesondere geneigt zur Vertikalen angeordnet ist; und einen Begrenzer für eine Verkippung der Lamellen-Halterung um die Querachse.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, wobei ein Massenschwerpunkt der Lamellen-Halterung abseits der Querachse liegt, und als Begrenzer ein Anschlag durch abgeschrägte, beiderseits der Querachse und gegenüber der gehaltenen Materialprobe befindliche Flächen der Lamellen-Halterung bereitgestellt ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9, umfassend einen Translations-Rotations-Wandler, wobei der rotierende Teil des Wandlers mit der Lamellen-Halterung und der translatierende Teil des Wandlers in verschieblicher Weise derart an der Vorrichtung angebracht ist, dass seine Translationsrichtung durch Drehen der Drehvorrichtung in eine zur Waagerechten geneigte Lage bringbar ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, aufweisend eine Partikelstrahlquelle und eine Partikelstrahlführung zum Richten eines Partikelstrahls auf eine Flachseite einer von der Lamellen-Halterung gehaltene Materialprobe, wobei der Partikelstrahl insbesondere ein fokussierter Innenstrahl ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 12, mit einer Elektronenstrahlquelle und einer Elektronenstrahlführung zum Richten eines Elektronenstrahls auf die von der Lamellen-Halterung gehaltene Materialprobe.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 13, wobei die Richtung der Querachse im Wesentlichen senkrecht zu einer Oberfläche der gehaltenen Materialprobe ist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder einem der davon abhängigen Ansprüche, ferner umfassend eine Halterung zur Anordnung der Lamellen-Halterung in einem von dem Partikelstrahl erfassten Raumbereich.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

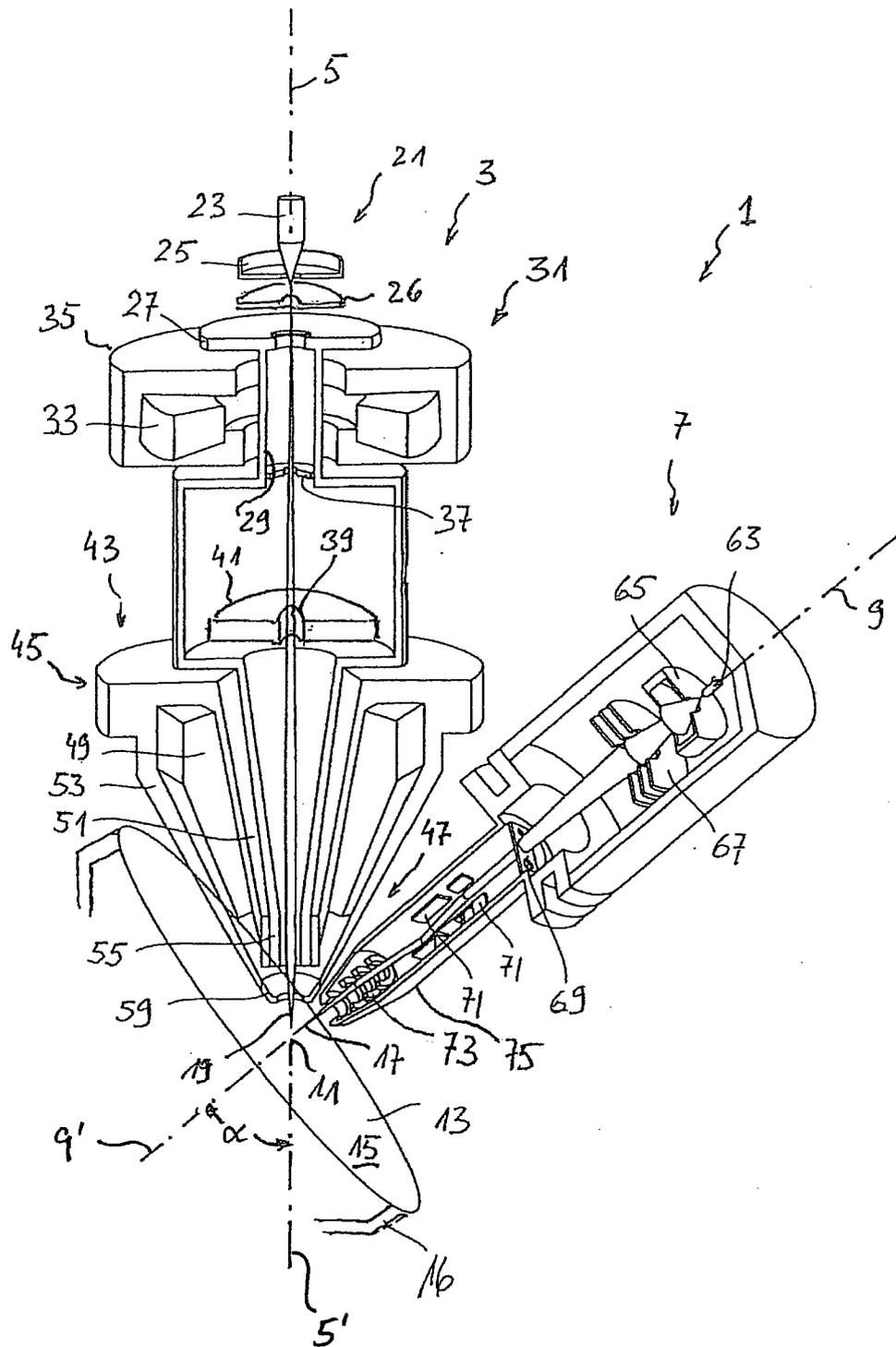


Fig. 1

Stand der Technik

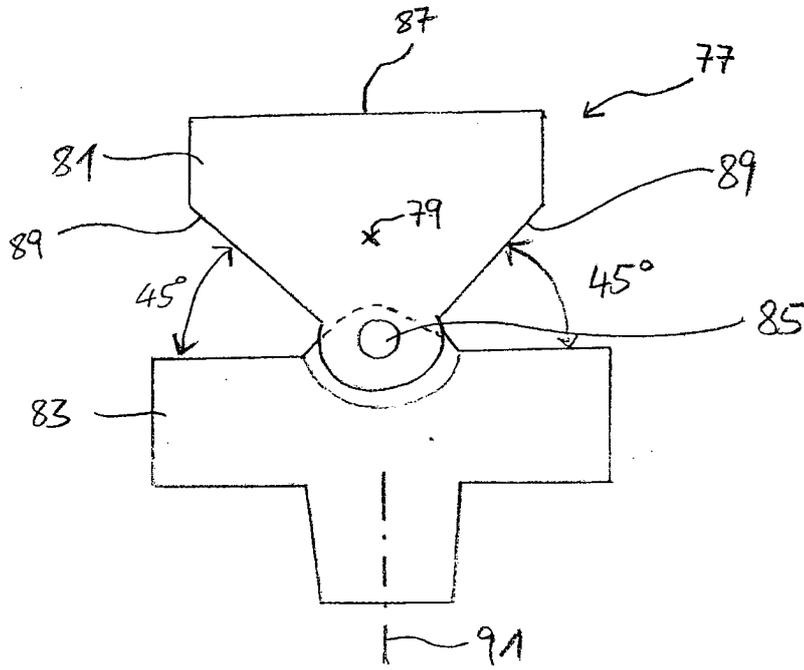


Fig. 2a

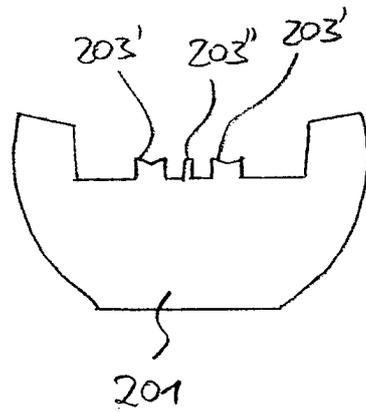


Fig. 2b

Stand der Technik

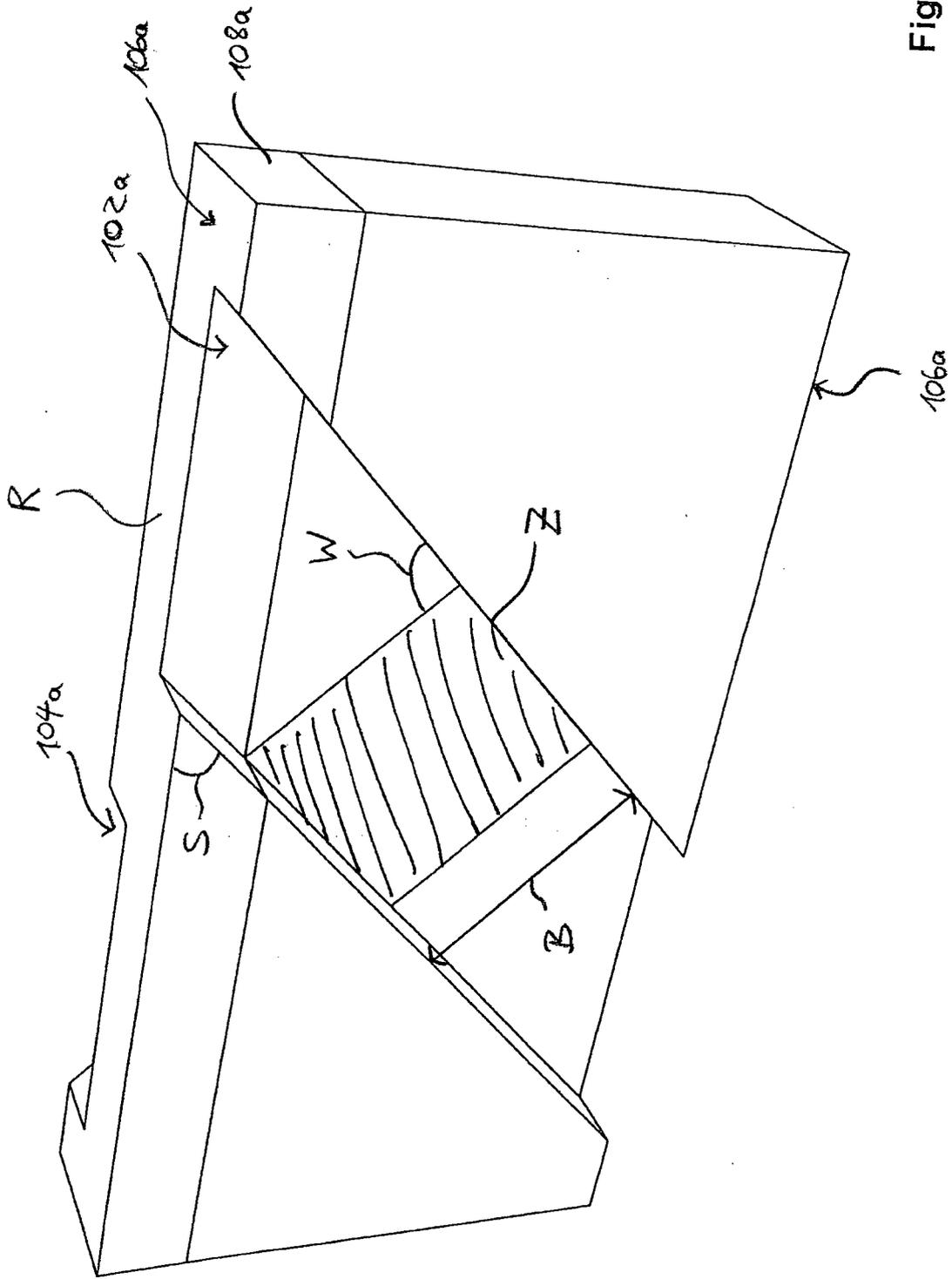


Fig. 4

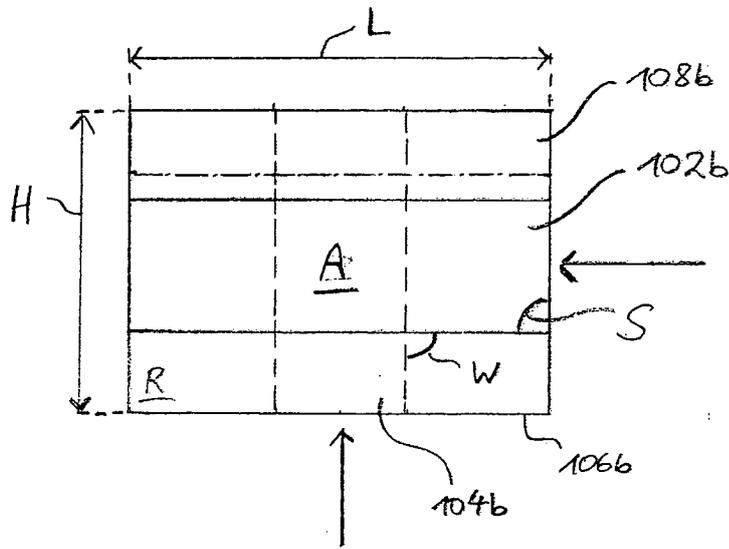


Fig. 5a

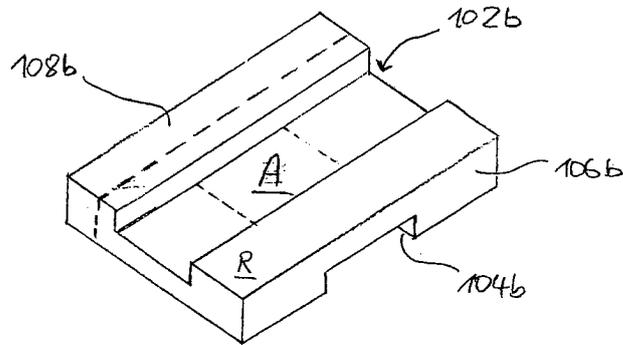


Fig. 5b

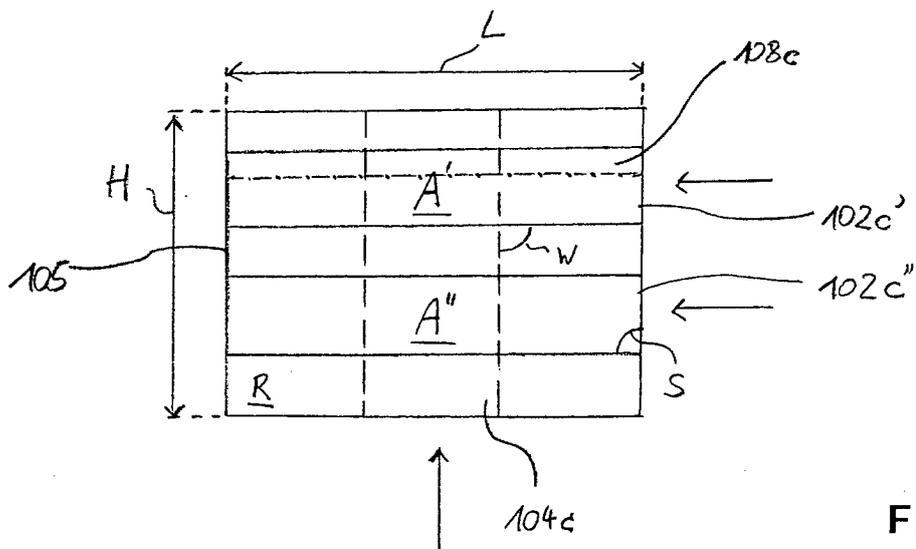


Fig. 6

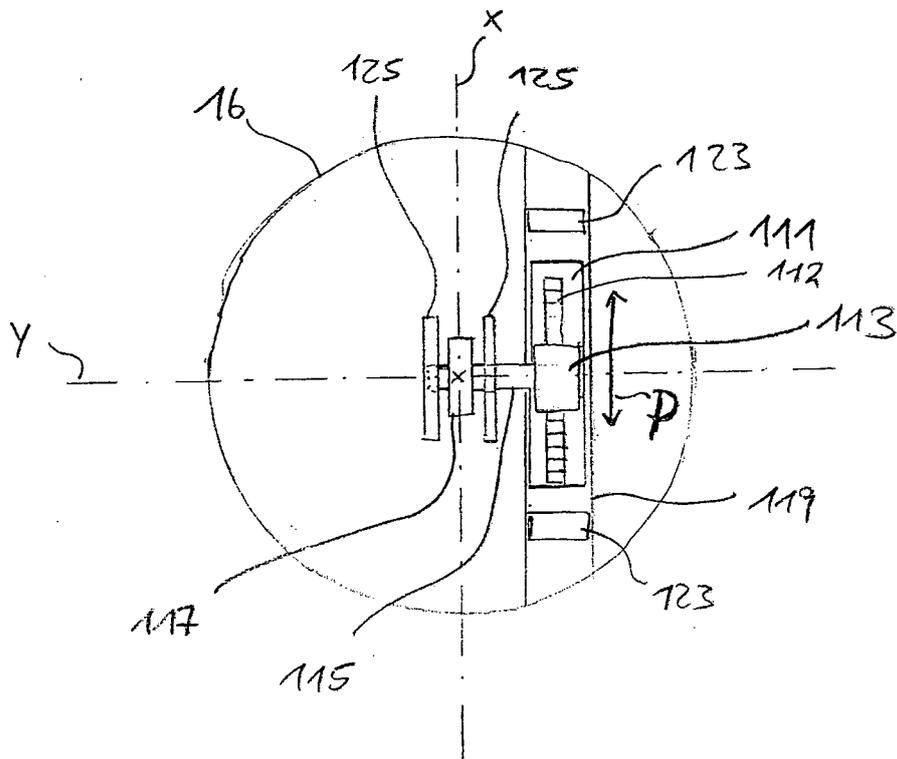


Fig. 7a

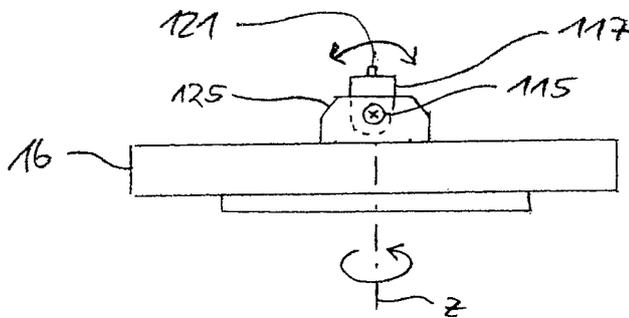


Fig. 7b

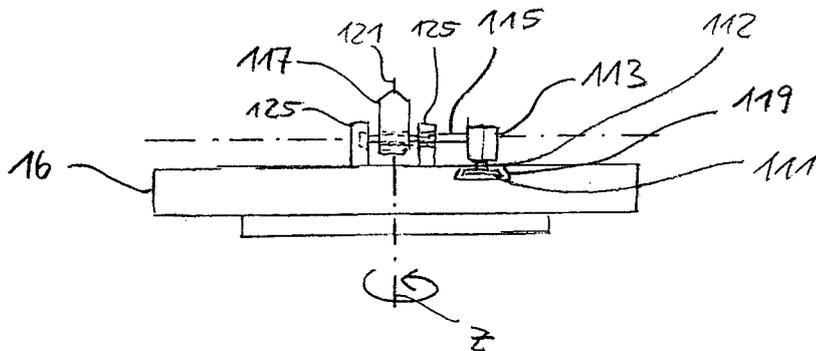


Fig. 7c

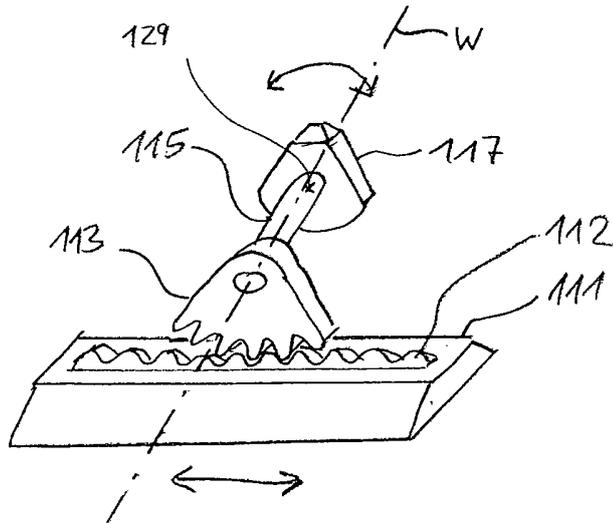


Fig. 8

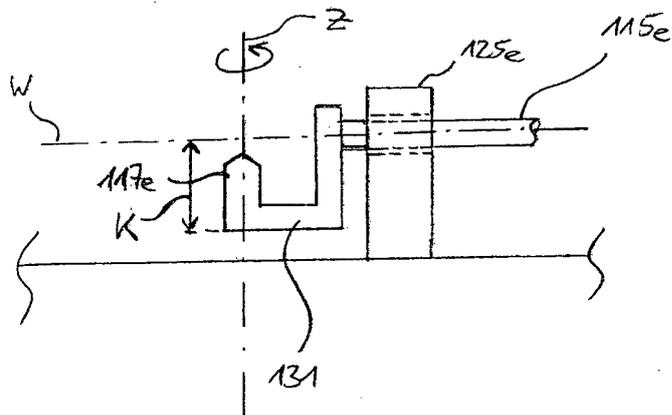


Fig. 9

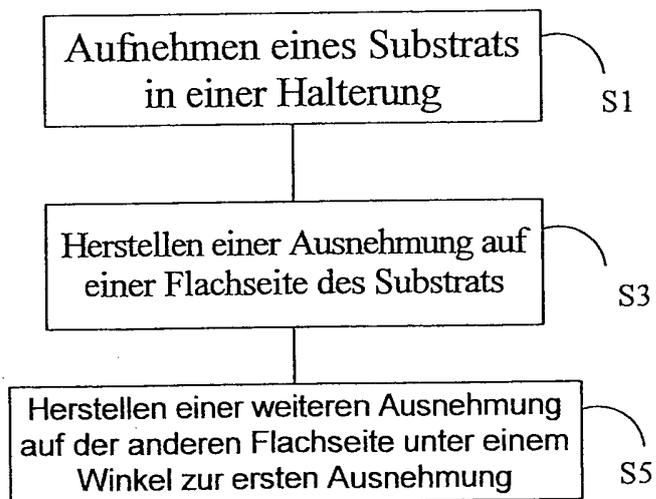


Fig. 10