



(10) **DE 10 2015 219 298 A1** 2017.04.06

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 219 298.9**

(22) Anmeldetag: **06.10.2015**

(43) Offenlegungstag: **06.04.2017**

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

**G01N 1/04 (2006.01)**

**B82Y 35/00 (2011.01)**

**B23K 15/08 (2006.01)**

**B23K 26/38 (2006.01)**

**B25J 7/00 (2006.01)**

**B81B 1/00 (2006.01)**

**B81C 1/00 (2006.01)**

**G01N 1/44 (2006.01)**

**C23F 4/00 (2006.01)**

**G01B 15/00 (2006.01)**

**G01N 23/00 (2006.01)**

**G01Q 70/00 (2010.01)**

**G01R 31/28 (2006.01)**

**H01J 37/252 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(72) Erfinder:

**Krause, Michael, Dr., 06108 Halle, DE; Höche,  
Thomas, Prof. Dr., 06120 Halle, DE**

(74) Vertreter:

**Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster &  
Partner mbB, 70174 Stuttgart, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**siehe Folgeseiten**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

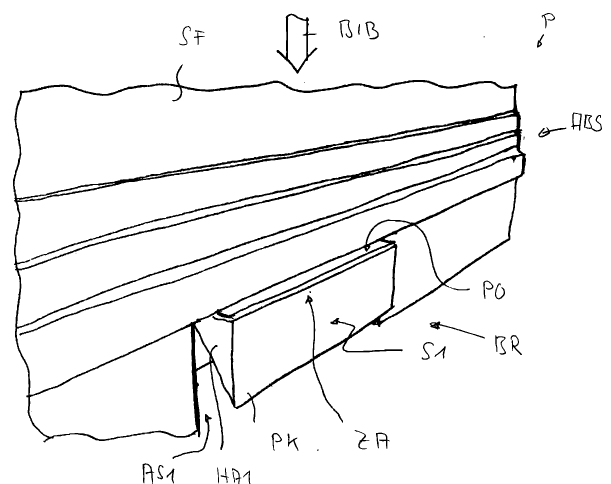
(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Präparation einer Probe für die Mikrostrukturdiagnostik sowie Probe für die Mikrostrukturdiagnostik**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Präparation einer Probe (P) für die Mikrostrukturdiagnostik wird durch materialabtragende Laserstrahlbearbeitung aus einem Substrat ein Probenkörper (PK) mit vorgegebener Gestalt präpariert. Anschließend wird ein Zielabschnitt (ZA) des Probenkörpers mittels Laserstrahlbearbeitung und/oder Ionenstrahlbearbeitung zur Freilegung eines für eine Mikrostrukturuntersuchung geeigneten Zielvolumens weiterbearbeitet. Das Verfahren umfasst folgende Schritte:

(a) Freistellen des Probenkörpers (PK) aus dem Substrat mittels mindestens einer Laserbearbeitungsoperation durch Einstrahlen mindestens eines Laserstrahls senkrecht und/oder schräg zu einer Substratoberfläche derart, dass ein Probenkörper entsteht, welcher an einer Probenkörper-Oberseite (PO) durch einen Bereich der Substratoberfläche sowie seitlich durch schräg oder senkrecht zu der Substratoberfläche orientierte Seitenflächen begrenzt ist, wobei eine Gestalt des Probenkörpers erzeugt wird, die mindestens einen massiven Handhabungsabschnitt (HA1, HA2) und angrenzend an den Handhabungsabschnitt einen relativ zum Handhabungsabschnitt dünneren Zielabschnitt (ZA) aufweist, welcher an einer Schmalseite durch die Probenkörper-Oberseite (PO) und seitlich durch senkrecht oder schräg zur Probenkörper-Oberseite verlaufende Seitenflächen begrenzt ist;

(b) Herstellen eines von dem Probenkörper gesonderten Probenkörper-Halters (PH), der an die Gestalt des Probenkörpers angepasste Aufnahmestrukturen (AST) zum Aufnehmen des Probenkörpers in einer definierten Aufnahme-position aufweist;

(c) Entnehmen des freigestellten Probenkörpers aus dem Substrat; ...



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	601 30 889	T2
DE	11 2011 103 677	T5
DE	11 2013 000 665	T5
US	2005 / 0 081 997	A1
US	2006 / 0 255 295	A1
US	2008 / 0 067 443	A1
US	2008 / 0 308 727	A1
US	2010 / 0 025 577	A1
US	2012 / 0 085 923	A1
US	2013 / 0 008 779	A1
US	2013 / 0 174 301	A1
US	2014 / 0 299 785	A1
US	2015 / 0 311 028	A1
US	5 907 157	A
EP	2 787 338	A1
JP	2009- 245 783	A
JP	2009- 170 117	A

**BARNA, Árpád:** Topographic kinetics and practice of low angle ion beam thinning. In: Specimen preparation for transmission electron microscopy of materials - III : symposium held December 5 - 6, 1991, Boston, Mass., U.S.A . Pittsburgh, PA : Materials Research Society, 1992 (Materials Research Society symposium proceedings : MRSSP ; 254 ). S. 3-22. - ISBN 1-55899-148-4

**CERCHIARA, R. R., et al.** Raising the standard of specimen preparation for aberration-corrected TEM and STEM. *Microscopy Today*, 2011, 19. Jg., Nr. 01, S. 16-19. Raising the Standard of Specimen Preparation for Aberration-Corrected TEM and STEM

**E.A. FISCHIONE INSTRUMENTS, INC.** Semiconductor sample preparation for scanning electron microscopy APPLICATION NOTE Document Number AN003 Revision 02 10/ 2013 <http://www.fischione.com/uploads/pdfs/application-pdfs/AN003.pdf> [30.6.2016]

**E.A. Fischione Instruments Inc.** Application note: Microelectronic device delayering using an adjustable broad#beam ion source 31.10.2013 <http://www.fischione.com/uploads/pdfs/application-pdfs/AN004.pdf>[rech. 29.6.2016]

**E.A. Fischione Instruments, Inc.** APPLICATIONNOTE: Model 1040 NanoMill ® TEM specimen preparation system - Specimen configuration 30.01.2014 <http://www.fischione.com/uploads/pdfs/application-pdfs/AN006.pdf> [rech. 28.6.2016]

**E.A. Fischione Instruments, Inc.** Model 1040 NanoMill ® TEM specimen preparation system product brochure 09.07.2009 [http://www.microscop.ru/uploads/model\\_1040.pdf](http://www.microscop.ru/uploads/model_1040.pdf) [rech. 29.6.2016]

**E.A. Fischione Instruments, Inc.** Model 1040 NanoMill® TEM Specimen Preparation

**System Product Brochure 12.09.2013** [http://www.fischione.com/uploads/Files/PB1040\\_0.pdf](http://www.fischione.com/uploads/Files/PB1040_0.pdf) [rech. 29.6.2016]

**E.A. Fischione Instruments, Inc.** Model 1040 NanoMill® TEM specimen preparation system 02.08.2012 [http://www.tvips.com/Download/Fischione/Presentations/M1040\\_NanoMill.pdf](http://www.tvips.com/Download/Fischione/Presentations/M1040_NanoMill.pdf) [rech. 29.6.2016]

**GENÇ, A., et al.** Post-FIB TEM sample preparation using a low energy argon beam. *Microscopy and Microanalysis*, 2007, 13. Jg., Nr. S02, S. 1520-1521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1431927607076064>

**H. S. Ubhi, A. C. Robins, R. R. Cerchiara , P. E.** Fischione Optimised Sample Preparation Using Large Area Ion Polishing On Leaded Brass For EBSD Characterisation, 09.07.2012 <https://www.microscopy.org/MandM/2012/abstract/LB-28.pdf> [rech. 30.6.2016]

**HÖCHE, Thomas, et al.** A Novel Laser Tool for High#Volume Sample Preparation. *Laser Technik Journal*, 2015, 12. Jg., Nr. 1, S. 42-44. 19 JAN 2015 DOI: 10.1002/latj.201500002

**KANG, Hyoung H., et al.** High Volume and Fast Turnaround Automated Inline TEM Sample Preparation for Manufacturing Process Monitoring. In: ISTFA 2010: Conference Proceedings from the 36th International Symposium for Testing and Failure Analysis; November 14-18, 2010 InterContinental Hotel Dallas Dall. ASM International, 2010. S. 102. <https://www.fei.com/documents/high-volume-and-fast-turnaround-automated-inline-TEM-sample-preparation/>

**KRAUSE, Michael [et al.]:** microPREP TM - a new laser tool for high-throughput sample preparation. In: Conference proceedings from the 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis, November 9 - 13, 2014, S. 261-267. - ISBN 978-1-62708-074-3

**KWAKMAN, Laurens, et al.** Sample preparation strategies for fast and effective failure analysis of 3D devices. In: ISTFA 2013: 39th international symposium for testing and failure analysis. 2013. S. 17-26 [https://www.researchgate.net/profile/Frank\\_Altmann3/publication/267517465\\_Sample\\_Preparation\\_Strategies\\_for\\_Fast\\_and\\_Effective\\_Failure\\_Analysis\\_of\\_3D\\_Devices/links/5587cf0508aef58c03a05ab6.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Frank_Altmann3/publication/267517465_Sample_Preparation_Strategies_for_Fast_and_Effective_Failure_Analysis_of_3D_Devices/links/5587cf0508aef58c03a05ab6.pdf)

**LI, Jian.** Advanced techniques in TEM specimen preparation. , *The Transmission Electron Microscope*, Dr. Khan Maaz (Ed.), ISBN: 978-953-51-0450-6, INTECH Open Access Publisher, 2012. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/34877.pdf>

**MAYER, Joachim, et al.** TEM sample preparation and FIB-induced damage. *Mrs Bulletin*, 2007, 32. Jg., Nr. 05, S. 400-407. <http://>



[www.nanolab.ucla.edu/nrf\\_old\\_site/FIB/pdf/MRS\\_Bulletin\\_2007\\_FIB\\_TEM\\_prep.pdf](http://www.nanolab.ucla.edu/nrf_old_site/FIB/pdf/MRS_Bulletin_2007_FIB_TEM_prep.pdf)

**PETZOLD, M., et al. Micro structure analysis for system in package components—Novel tools for fault isolation, target preparation, and high-resolution material diagnostics. In: 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2010. S. 1296-1302. DOI: 10.1109/ECTC.2010.5490648**

**Peterson Brennan L., TEM Sample Preparation Tips, FEI Company 03WP-TE0111 © 5/2008 <https://www.fei.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=21474838571>**

**ROBINS, A. C., et al. Delayering of Microelectronic Devices Using an Adjustable Broad-Beam Ion Source. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2013. S. 012046.**

**SALZER, R.; STEGMANN, H. Efficient and Precise Sample Preparation by Combination of Pulsed Laser Ablation and FIB Milling. Microscopy and Microanalysis, 2012, 18. Jg., Nr. 2, S. 636-637 doi:10.1017/S143192761200503X.**

**VAN MIERLO, Willem, et al. Practical aspects of the use of the X 2 holder for HRTEM-quality TEM sample preparation by FIB. Ultramicroscopy, 2014, 147. Jg., S. 149-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2014.08.007>**

**VÖLLNER, J., et al. Topography evolution mechanism on fused silica during low-energy ion beam sputtering. Journal of Applied Physics, 2011, 109. Jg., Nr. 4, S. 043501-043501-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3549170>**

**WAGNER, Uwe, et al. microPREP: a new laser tool for high-volume sample preparation. In: SPIE LASE. International Society for Optics and Photonics, 2016. S. 97360C-97360C-9. (March 4, 2016); doi:10.1117/12.2212444**

**Beschreibung**ANWENDUNGSGEBIET  
UND STAND DER TECHNIK

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Präparation einer Probe für die Mikrostrukturdiagnostik, worin durch materialabtragende Laserstrahlbearbeitung aus einem Substrat ein Probenkörper mit vorgegebener Gestalt präpariert und anschließend ein Zielabschnitt des Probenkörpers mittels Laserstrahlbearbeitung und/oder Ionenstrahlbearbeitung zur Freilegung eines für eine Mikrostrukturuntersuchung geeigneten Zielvolumens weiterbearbeitet wird. Die Erfindung betrifft auch eine nach dem Verfahren erhältliche oder hergestellte Probe für die Mikrostrukturdiagnostik.

**[0002]** Für eine hochaufgelöste Mikrostrukturdiagnostik bzw. Analytik stehen unter anderem die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), die Atomsonden-Tomographie (APT) und die Röntgenmikroskopie (XRM) zur Verfügung. Sofern die analytische Fragestellung keine bestmögliche Ortsauflösung bei gleichzeitig hoher spektraler Nachweisgrenze (wie im Falle von TEM und APT) bzw. eine zerstörungsfreie Messung (wie z.B. im Falle der XRM) erfordert, können die wirtschaftlicheren Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie (REM) angewandt werden.

**[0003]** Ein wesentlicher Vorteil rasterelektronenmikroskopischer Analytik besteht in der Möglichkeit zur (ggf. automatischen) Analyse ausgedehnter Bereiche von typischerweise aktuell bis zu ca.  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  Grundfläche. Im Gegensatz zur Transmissionselektronenmikroskopie besteht dabei grundsätzlich keine Notwendigkeit von Elektronentransparenz im Bereich des zu untersuchenden Zielvolumens. Vielmehr werden in der Regel die (freien) Oberflächen ausgedehnter Volumenproben analysiert. Dadurch ergibt sich für die Probenpräparation unter anderem die Forderung nach einer Präparation einer möglichst schädigungsfreien Oberfläche.

**[0004]** Bislang werden Proben für die Rasterelektronenmikroskopie vor allem durch metallographische Techniken (z.B. die Erzeugung von Querschliffen, welche mechanisch poliert werden), mit Hilfe der fokussierten Ionenstrahltechnik (Focussed Ion Beam, FIB) oder aber mittels Ionenbreitstrahlen (Broad Ion Beam, BIB) erzeugt. Die hohen Anschaffungs- und Unterhaltskosten von FIB-Systemen beschränken deren Anwendung dabei praktisch auf spezielle Fragestellungen, bei denen hohe Zielgenauigkeit (bis hin zu wenigen Nanometern) oder aber die Freilegung im Inneren eines Präparats verborgener Strukturen oberste Priorität hat. Gleichzeitig limitieren deren geringe Gesamtvolumen-Abtragsraten infolge der niedrigen Dosis die zugänglichen Probedimensionen.

So werden z.B. mittels Ga-FIB für die Vermessung im Rasterelektronenmikroskop derzeit üblicherweise nur Querschnitte von ca.  $30 \times 15 \mu\text{m}^2$  erzeugt. Im Falle von Xe-Plasma-FIB-Strahlen können etwas größere Flächen präpariert werden, derzeit z.B. maximal ca.  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ . Ein weiterer Nachteil der FIB-Technik betrifft die ausgedehnte Schädigung der Oberfläche infolge der Bestrahlung mit hochenergetischen Ionen.

**[0005]** Im Gegensatz hierzu ermöglicht die Anwendung von Ionenbreitstrahl-Ätzverfahren die Freilegung ausgedehnter Bereiche mit sehr geringer Schädigung der Oberfläche bedingt durch sehr niedrige Landeenergien der eingesetzten Edelgasionen. Darüber hinaus zeichnen sich die entsprechenden Anlagen durch vergleichsweise niedrige Kosten und sehr einfache Bedienung aus.

**[0006]** Als ein Nachteil von Ionenbreitstrahl-Ätzverfahren wird häufig deren per se kaum vorhandene Zielgenauigkeit angesehen. Während beim Einsatz von Ionenbreitstrahlen zur Aufreinigung von metallographischen Querschliffen die Zielgenauigkeit im Kern durch die mechanische Präparation gegeben ist, werden für eine Zielpräparation im weitesten Sinne (Zielgenauigkeit von z.B. bestenfalls  $50\text{--}100 \mu\text{m}$ ) derzeit besondere Techniken genutzt. Zu diesen gehören die Abschattungsverfahren, insbesondere das Böschungsschnittverfahren, das gelegentlich auch als Ionenstrahl-Böschungssätzen bezeichnet wird.

**[0007]** Ionenbreitstrahlbearbeitung im Böschungsschnittverfahren beruht im Prinzip auf einer partiellen Abschattung des Ionenbreitstrahls durch ein Maskelement mit niedrigerer Ätzrate als das zu bearbeitende Probenmaterial. Der durch das Maskelement nicht abgedeckte Teil der Oberfläche wird ionengeätzt, bis eine Art Böschung entsteht.

**[0008]** Heutzutage sind Ionenbreitstrahlanlagen für Böschungsschnitte von unterschiedlichen Anbietern kommerziell erhältlich. Allen gemeinsam sind vergleichsweise restriktive Anforderungen an die Gestalt der zu bearbeitenden Proben.

**[0009]** Bei einem bekannten Verfahren wird zunächst ein Probenkörper durch Zurechtschneiden in eine Plattenform geeigneter Größe gebracht und dann an einem größeren, ebenfalls plattenförmigen Probenkörper-Halter aus Titan angebracht, der als Maskelement dient. Ein kleiner Teil des Probenkörpers (z.B.  $20 \mu\text{m}$  bis  $200 \mu\text{m}$ ) ragt dabei über eine Kante des Maskelements hinaus und bleibt dadurch sichtbar. Ein breiter Ionenstrahl wird dann senkrecht zu dieser Kante des Maskelements derart eingestrahlt, dass etwa die Hälfte des Strahls auf den Probenkörper trifft und der übrige Anteil auf das Maskelement. Die Ionen tragen allmählich den sichtbaren Teil des Probenkörpers ab, während der

Rest durch das Maskenelement gegen Ionenangriff geschützt wird. Im Laufe der Bestrahlung wird dadurch hinter der Kante des Maskenelements am Probenkörper eine saubere flache Oberfläche freigelegt, die mittels REM untersucht werden kann.

**[0010]** Bei der Präparation der plattenförmigen Probe können sich nicht unerhebliche Ungenauigkeiten ergeben. Insbesondere Abweichungen hinsichtlich der notwendigen Planparallelität der Platte können zu Problem mit Wiederanlagerung von abgetragenem Material während der Ionenstrahlbearbeitung bzw. einem undefinierten Einlaufverhalten an der Kante der eigentlichen Probe führen. Weiterhin kann es in manchen Anwendungsfällen sein, dass die Positioniergenauigkeit des Zielgebiets der Probe relativ zur Maske parallel zur Plattenebene nicht ausreicht. Auch für erfahrene Nutzer ist es schwierig, systematisch und reproduzierbar Positioniergenauigkeiten besser als 50–100 µm zu erzielen.

#### AUFGABE UND LÖSUNG

**[0011]** Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein reproduzierbar zuverlässiges, an Artefakten armes, zielgenaues und schnelles Verfahren zur Erzeugung ausgedehnter und schädigungsarmer Querschnittsflächen für die Mikrostrukturdiagnostik mittels Rasterelektronenmikroskopie bereitzustellen.

**[0012]** Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Weiterhin wird die Aufgabe gelöst durch eine Probe mit den Merkmalen von Anspruch 28. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

**[0013]** Der Probenkörper hat eine von einer Plattenform abweichende, nicht-plattenförmige Gestalt mit im Winkel zueinander stehenden Abschnitten oder Flächen. Dadurch kann unter anderem eine hohe Positioniergenauigkeit beim Fixieren am Probenkörper-Halter erreicht werden. Der Probenkörper-Halter hat an die Geometrie bzw. Gestalt des Probenkörpers angepasste Aufnahmestrukturen und kann unmittelbar als Maskenelement in einem Böschungsschnittverfahren zur Freilegung einer Oberfläche des an dem Probenkörper-Halter fixierten Probenkörpers durch Ionenbestrahlung verwendet werden.

**[0014]** Das Verfahren zur Präparation einer Probe für die Mikrostrukturdiagnostik ist ein mehrstufiges Verfahren, bei welchem in einer früheren Stufe durch materialabtragende Laserstrahlbearbeitung aus einem Substrat ein Probenkörper mit vorgebarter Gestalt präpariert wird und bei dem anschließend ein Zielabschnitt des Probenkörpers mittels Laserstrahl-

bearbeitung und/oder Ionenstrahlbearbeitung weiterbearbeitet wird, um ein Zielvolumen freizulegen, welches für eine Mikrostrukturuntersuchung mithilfe eines oder mehrerer Verfahren der Mikrostrukturdiagnostik geeignet sein soll. Das Zielvolumen ist dabei derjenige räumlich begrenzte Bereich des Probenkörpers, in welchem die Mikrostruktur genauer untersucht werden soll. Der Begriff „Probe“ bezeichnet diejenige Einheit, die in ein entsprechendes Probenaufnahmesystem einer Anlage zur Mikrostrukturdiagnostik eingebaut werden soll. Eine freigelegte Oberfläche des Zielvolumens kann z.B. mittels REM untersucht werden.

**[0015]** Im Schritt (a) wird der Probenkörper mittels mindestens einer Laserbearbeitungsoperation durch Einstrahlen mindestens eines Laserstrahls senkrecht und/oder schräg zur Substratoberfläche freigestellt. Die Verfahrensführung ist dabei so, dass ein Probenkörper entsteht, welcher an einer Probenkörper-Oberseite durch einen Bereich der Substratoberfläche begrenzt wird. An den im Winkel zur Probenkörper-Oberseite stehenden Seiten wird der Probenkörper durch schräg oder senkrecht zu der Substratoberfläche orientierte Seitenflächen begrenzt. Diese werden durch die Laserbearbeitungsoperation erstmalig freigelegt bzw. erzeugt.

**[0016]** Beim Schritt des Freistellens wird eine Gestalt des Probenkörpers erzeugt, die mindestens einen massiven Handhabungsabschnitt und angrenzend an den Handhabungsabschnitt einen relativ zum Handhabungsabschnitt dünneren Zielabschnitt aufweist. Der Zielabschnitt ist an einer Schmalseite durch die Probenkörper-Oberseite und seitlich durch die senkrecht oder schräg zur Probenkörper-Oberseite verlaufenden Seitenflächen begrenzt. Die Lage des Zielabschnitts wird dabei so gewählt, dass das interessierende Zielvolumen innerhalb des Zielabschnitts liegt.

**[0017]** Die geometrische Gestalt und die Dimensionen des Handhabungsabschnitts und des Zielabschnitts sind für ihre jeweiligen Funktionen optimiert. Der Handhabungsabschnitt (Handlingabschnitt, handling portion) soll dabei so massiv und mechanisch stabil sein, dass eine Handhabung des Probenkörpers in nachfolgenden Verfahrensschritten mithilfe des Handhabungsabschnitts erfolgen kann, ohne am Zielabschnitt angreifen zu müssen. Insofern hat der Handhabungsabschnitt die Funktion eines Griffabschnitts, an welchem später ein Bediener manuell mithilfe eines Instruments, wie z.B. einer Pinzette, oder aber mithilfe eines Manipulationssystems angreifen kann, um den Probenkörper bei nachfolgenden Verfahrensschritten handzuhaben.

**[0018]** Der dünnere Zielabschnitt braucht keine besonders hohe mechanische Stabilität aufzuweisen. Seine relevante Dicke kann daher so eingestellt wer-

den, dass bei nachfolgenden materialabtragenden Präparationsschritten zur Freilegung des Zielvolumens nur noch relativ wenig Material abzutragen ist, wodurch die nachfolgenden materialabtragenden Verfahrensschritte nur noch relativ wenig Zeit benötigen. Die Gestalt des Zielabschnitts kann an die Bedürfnisse des vorgesehenen Mikrostrukturdiagnostikverfahrens angepasst sein. Beispielsweise kann der Zielabschnitt eine im Wesentlichen plattenförmige Gestalt haben, was jedoch nicht zwingend ist. Der Zielabschnitt kann auch die Gestalt einer einseitig oder beidseitig gestuften Platte haben und/oder eine Gestalt mit mindestens einer polygonalen Stirnfläche, also einer Stirnfläche, die zwei oder mehr in schrägem Winkel zueinander stehende Flächenabschnitte aufweist.

**[0019]** Örtlich und zeitlich unabhängig vom Freistellen des Probenkörpers wird ein von dem Probenkörper gesonderter Probenkörper-Halter hergestellt. Der Probenkörper-Halter hat Aufnahmestrukturen, die an die Gestalt des Probenkörpers angepasst sind und zum Aufnehmen des Probenkörpers in einer definierten Aufnahmeposition am Probenkörper-Halter ausgelegt sind. Die Herstellung des Probenkörper-Halters kann zeitlich vor dem Freistellungsschritt erfolgen und komplett abgeschlossen sein, bevor der Probenkörper erzeugt wird. Probenkörper-Halter können auf Vorrat gefertigt werden. Es ist auch möglich, dass der Freistellungsschritt sich zeitlich mit dem Herstellen des Probenkörper-Halters überlappt oder zeitlich vollständig nach dem Freistellen des Probenkörpers erfolgt.

**[0020]** Die Aufnahmestrukturen am Probenkörper-Halter sind an die Gestalt des Probenkörpers oder an die Gestalt einer bestimmten Klasse von Probenkörpern u.a. bezüglich ihrer Geometrie angepasst, so dass ein Probenkörper-Halter in der Regel kein Universalhalter ist, sondern im Hinblick auf gewisse Probenkörper-Geometrien optimiert sein kann. Abseits der Aufnahmestrukturen kann der Probenkörper-Halter prinzipiell frei gestaltet werden, insbesondere so, dass er für Aufnahmestrukturen in Vorrichtungen für nachfolgende Verfahrensschritte und für die eigentliche Mikrostrukturuntersuchung passend ist.

**[0021]** Zu einem geeigneten Zeitpunkt wird im Schritt (c) (Entnahmeschritt, removal step) der freigestellte Probenkörper aus dem Substrat entnommen.

**[0022]** Der entnommene Probenkörper wird danach im Schritt (d) an den Aufnahmestrukturen des zugeordneten Probenkörper-Halters so fixiert, dass er sich in der gewünschten und durch die Gestalt der Aufnahmestrukturen vorgegebenen Aufnahmeposition befindet. Durch den Schritt (d) des Fixierens entsteht ein fester räumlicher Bezug zwischen Probenkörper und Probenkörper-Halter. Durch die Fixierung hält die Verbindung auch bei Bewegungen oder Er-

schütterung und/oder in unterschiedlichen Orientierungen.

**[0023]** Der Probenkörper-Halter und der daran fixierte Probenkörper sind die konstituierenden Komponenten der Probe, deren Gestalt und Dimension an Gestalt und Dimension eines Probenaufnahmesystems in einer Anlage zur Mikrostrukturdiagnostik angepasst ist. Es wird somit eine mehrteilige Probe geschaffen, beispielsweise eine zweiteilige Probe aus Probenkörper-Halter und daran fixiertem Probenkörper.

**[0024]** Bei manchen Verfahrensvarianten wird der Probenkörper an den Aufnahmestrukturen durch Kleben mithilfe eines Klebstoffs befestigt bzw. fixiert. Abhängig von den Materialien von Probenkörper und Probenkörper-Halter ist ggf. auch eine Verschweißung möglich, z.B. mittels Laserstrahls.

**[0025]** Nach dem Herstellen der Probe durch Fixieren des Probenkörpers am Probenkörper-Halter wird im Schritt (e) mindestens eine weitere materialabtragende Bearbeitung an mindestens einer Seitenfläche des Probenkörpers im Bereich des Zielabschnitts durchgeführt, um das Zielvolumen freizulegen.

**[0026]** Für einen finalen Bearbeitungsschritt wird eine Ionenstrahlbearbeitung eingesetzt, um eventuelle Bearbeitungsreste der Laserstrahlbearbeitung zu beseitigen und das Zielvolumen für die nachfolgende Mikrostrukturuntersuchung endgültig freizulegen. Eine freigelegte Oberfläche des Zielvolumens kann dann mittels REM untersucht werden.

**[0027]** Das Verfahren und die mithilfe des Verfahrens hergestellten Proben bieten zahlreiche Vorteile im Vergleich zum Stand der Technik.

(i) Die ehemalige Substratoberfläche im Bereich der Probenkörper-Oberfläche kann während der gesamten Probenpräparation weitgehend unangetastet bestehen bleiben. Das Zielvolumen kann somit bei Bedarf in unmittelbarer Nähe der ehemaligen Substratoberfläche (Probenkörper-Oberfläche) liegen. Dadurch ist eine Möglichkeit zur direkten Präparation von Querschnittsproben ohne Sandwichverklebung des Ausgangsmaterials geschaffen.

(ii) Die Beobachtungsrichtung bei einer späteren Mikrostrukturuntersuchung kann parallel oder annähernd parallel zur ehemaligen Substratoberfläche liegen, wodurch unter anderem Grenzflächen zwischen oberflächennahen Schichten beobachtbar werden.

(iii) Die Dicke des Zielabschnitts kann unabhängig von der Substratdicke festgelegt werden.

(iv) Der Zielabschnitt kann bei Bedarf ein relativ kleines Volumen umfassen, da der Probenkörper dennoch über den vergleichsweise dickeren, massiveren Handhabungsabschnitt immer manipuliert

bar bleibt. Ein relativ dünner Zielabschnitt verkürzt die anschließenden Materialabtragprozesse, wodurch man schneller zur fertigen Probe kommen kann..

(v) Das Verfahren erlaubt eine nahezu artefaktfreie Realisierung von Proben mit schädigungsarm präparierter Oberfläche des Zielvolumens. Auch Proben für andere Untersuchungsverfahren, die kleinste Probendimensionen und eine zielgenaue Präparation fordern, sind möglich.

**[0028]** In manchen Fällen ist es ausreichend, wenn ein Probenkörper nur einen einzigen Handhabungsabschnitt aufweist. Bei anderen Ausführungsformen werden am Probenkörper ein erster Handhabungsabschnitt und mindestens ein zweiter Handhabungsabschnitt erzeugt, die in einem Abstand zueinander liegen. Zwischen den Handhabungsabschnitten kann ein vergleichsweise dünnerer Zwischenabschnitt liegen. Zwei (oder mehr) Handhabungsabschnitte bieten mehr Möglichkeiten zum Angreifen am Probenkörper bei den späteren Verfahrensschritten. Zudem ist es möglich, mithilfe von zwei zueinander beabstandeten Handhabungsabschnitten eine besonders positionsgenaue und belastbare Fixierung an entsprechend gestalteten Aufnahmestrukturen eines Probenkörper-Halters mit einer Vielzahl von Kontaktflächen zu erreichen.

**[0029]** Ein mechanisch stabiler Handhabungsabschnitt kann an einem Ende des Probenkörpers angebracht sein. Es ist auch möglich, einen Handhabungsabschnitt etwa in der Mitte und/oder mit Abstand zu beider Enden eines Probenkörpers auszubilden. Wenn zwei Handhabungsabschnitte vorgesehen sind, können diese z.B. an den gegenüberliegenden Enden des Probenkörpers angebracht sein, so dass dieser einem Knochen ähneln kann. Die mechanisch stabilen, dickeren Handhabungsabschnitte müssen jedoch nicht am seitlichen Rand des Probenkörpers liegen, sondern können vom Rand nach innen versetzt sein. Drei oder mehr voneinander durch Zwischenabschnitte getrennte Handhabungsabschnitte können z.B. bei sehr langen Probenkörpern aus Gründen der Stabilität sinnvoll sein.

**[0030]** Bei dem zwischen dem ersten Handhabungsabschnitt und dem zweiten Handhabungsabschnitt liegenden Zwischenabschnitt kann es sich um einen Abschnitt des Probenkörpers handeln, der nicht als Zielabschnitt benötigt wird und der hauptsächlich der besseren Fixierung an den Aufnahmestrukturen dienen kann. Bei anderen Ausführungsformen liegt der Zielabschnitt zwischen dem ersten Handhabungsabschnitt und dem zweiten Handhabungsabschnitt, so dass der Zwischenabschnitt dem Zielabschnitt entspricht. Hierdurch kann eine besonders positionsgenaue Fixierung des Probenkörpers und eine sichere Positionierung des Zielabschnitts am Probenkörperhalter begünstigt werden.

**[0031]** Beim Schritt (a) des Freistellens kann der Probenkörper in einer durchgehenden Laserbearbeitungsoperation komplett freigestellt werden, so dass er ohne weiteres aus dem Substrat entnommen werden kann. Bei anderen Ausführungsformen wird beim Schritt (a) des Freistellens so vorgegangen, dass an mindestens einer Stelle einer Seitenfläche des Handhabungsabschnitts eine Haltestruktur aus Substratmaterial verbleibt, welche den ansonsten freigestellten Probenkörper im Bereich des Handhabungsabschnitts mit einem angrenzenden Abschnitt des Substrats verbindet, so dass der Probenkörper nur über die Haltestruktur mit dem Rest des Substrats verbunden ist. Dadurch kann erreicht werden, dass der ansonsten freigestellte Probenkörper bei nachfolgenden Operationen zunächst nur durch das Rest-Substrat gehalten wird, so dass keine gesonderte Halteinrichtung nötig ist. Der freigestellte Probenkörper kann bis zum Entnehmen des Probenkörpers (Schritt (c)) mit dem Substrat verbunden bleiben.

**[0032]** Im Zusammenhang mit dem Entnehmen des Probenkörpers gibt es mehrere Möglichkeiten, die Verbindung zwischen dem (weitgehend) freigestellten Probenkörper und dem Substrat zu lösen. Bei manchen Verfahrensvarianten bewirkt das Entnehmen des Probenkörpers im Schritt (c) unmittelbar eine Trennung der Verbindung zwischen dem Probenkörper und dem Substrat im Bereich der Haltestruktur. Durch den Akt des Entnehmens kann die Haltestruktur z.B. aufgebrochen werden, ohne dass weitere Maßnahmen oder Mittel zum Herauslösen notwendig sind.

**[0033]** Wenn mehrere Handhabungsabschnitte und/oder mehrere Haltestrukturen vorhanden sind, kann auch so vorgegangen werden, dass eine oder mehrere der Haltestrukturen durch Laserstrahlbearbeitung beseitigt werden, so dass der Probenkörper dann frei wird. Prinzipiell kann das Verfahren so geführt werden, dass alle Haltestrukturen mittels Laserbestrahlung entfernt werden. Es ist z.B. möglich, eine Haltestruktur unmittelbar vor der Entnahme mittels Laserstrahls durchzutrennen, ggf. ohne gleichzeitiges Anblasen mit Druckluft. In diesen Fällen ist es in der Regel sinnvoll, an dem Probenkörper vor Auflösen der Haltestrukturen anzugreifen, so dass die folgende Entnahme schnell und einfach vorgenommen werden kann. Prinzipiell ist es auch möglich, dass der Probenkörper aus dem Substrat zunächst nach Auflösen einer letzten Haltestruktur aus dem Substrat herausfällt und später aufgenommen wird.

**[0034]** Der Schritt (a) des Freistellens kann auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden. Bei manchen Verfahrensvarianten wird beim Schritt (a) des Freistellens angrenzend an mindestens eine der Seitenflächen bei der Laserstrahlbearbeitung ein Volumenbereich aus Substratmaterial beseitigt, welcher – gemessen senkrecht zur Normalen der freigeleg-

ten Seitenfläche – an einer der mehreren Stellen oder auf gesamter Länge eine Breite aufweist, die ein Vielfaches der Breite einer Laserstrahl-Schnittbahn aufweist. Es wird also eine weiträumige Freistellung im Bereich der jeweiligen Seitenfläche vorgenommen. Hierdurch können angrenzend an eine Seitenfläche relativ (im Vergleich zur Breite einer Laserstrahl-Schnittbahn) große, materialfreie Volumenbereiche entstehen, die eine wirkungsvolle Reinigung der Bearbeitungszone während der Laserbearbeitung durch Anblasen oder Freiblasen begünstigen und die auch zu einem besseren Handling beim Herauslösen beitragen können, weil die Zugänglichkeit des Probenkörpers verbessert wird. Zudem hat sich gezeigt, dass weiträumig freigelegte Seitenflächen eine wesentlich bessere Oberflächenqualität haben können als Flankenflächen eines einfachen Schnittspalts bzw. einer Laserstrahl-Schnittbahn.

**[0035]** Während eine Laserstrahl-Schnittbreite je nach Fokussierung und Material typischerweise im Bereich von ca. 10 µm bis 30 µm liegt, liegt die oben genannte Breite des Volumenbereichs vorzugsweise bei 200 µm oder mehr, z.B. im Bereich von 300 µm bis 1000µm.

**[0036]** Die weiträumige Freistellung mit der Erzeugung größerer materialfreier Volumenbereiche kann z.B. durch scannende Führung eines fokussierten Laserstrahls erreicht werden, indem der freizulegende Bereich mit zueinander parallelen Schnitten bzw. teilweise überlappende Schnittbahnen eines fokussierten Laserstrahls sukzessive abgescannt wird.

**[0037]** Es sind auch nicht-scannende Verfahrensvarianten möglich, bei denen durch geeignete Strahlformung erreicht werden kann, dass angrenzend an eine freizulegende Seitenfläche ein größerer Volumenbereich beseitigt wird. Beispielsweise kann beim Freistellen des Probenkörpers ein Verfahren der Maskenprojektion eingesetzt werden, um durch flächige Bestrahlung mit Laserstrahlung zeitgleich größere Volumenbereiche von Substratmaterial zu beseitigen. Eine Strahlformung zur Erzielung eines bestimmten Strahlquerschnitts kann auch mithilfe diffraktiver optischer Elemente oder anderer der Strahlformung dienenden Einrichtungen des Laserbearbeitungssystems erreicht werden. Es können auch Laser, z.B. Festkörperlaser, verwendet werden, die per se einen Linienfokus erzeugen.

**[0038]** Das Verfahren stellt keine besonderen Anforderungen an die Dicke des Substrats, aus welchem der Probenkörper herauspräpariert werden soll. Sofern das Substrat dünn genug ist, kann es beim Freistellen des Probenkörpers ausreichen, den Probenkörper bei der Erzeugung der Seitenflächen aus dem Substrat herauszuschneiden, so dass diejenige Substratoberfläche, die der Probenkörper-Oberseite ge-

genüberliegt, eine rückseitige Grenzfläche des Probenkörpers bildet.

**[0039]** Das ist, abhängig vom Substratmaterial, z.B. bei Substratdicken bis zu ca. 500 µm bis maximal 650 µm in vielen Fällen sinnvoll.

**[0040]** Es ist jedoch auch ohne weiteres möglich, einen Probenkörper aus einem oberflächennahen Bereich eines dicken Substrats herauszupräparieren, ohne das Substrat vollständig zu durchtrennen. Bei einer Verfahrensvariante wird beim Schritt (a) des Freilegens der Probenkörper derart erzeugt, dass eine senkrecht zur Substratoberfläche gemessene Ausdehnung des Probenkörpers geringer ist als eine senkrecht zur Substratoberfläche gemessene Dicke des Substrats. Dabei kann insbesondere so vorgegangen werden, dass beim Schritt (a) des Freilegens in einem Zwischenschritt mittels Laserstrahlbearbeitung zwei in einem Winkel zueinander stehende, gegenüberliegenden Seitenflächen erzeugt werden, welche sich in einer im Inneren des Substrats liegenden Schnittlinie schneiden. Der Winkel kann z.B. weniger als 90° betragen. Der Probenkörper kann somit durch schrägen Einfall von Laserstrahlung von mindestens einer Seite aus der oberflächennahen Region freigestellt werden. Die Probenkörper-Oberseite kann dabei an mindestens einer Seite unterschritten bzw. hinterschnitten werden. Es ist auch möglich, einen Hinterschnitt oder Unterschnitt an zwei gegenüberliegenden Seiten zu erzeugen. Die relativ zur Oberflächennormalen der Probenkörper-Oberseite gemessenen Einfallswinkel können beispielsweise im Bereich von ca. 10° bis ca. 55° liegen, häufig sind jedoch nicht mehr als 45° vorgesehen und auch ausreichend. Der Probenkörper kann somit nach dieser Bearbeitungsstufe aus geeigneter Richtung betrachtet annähernd die Form eines Keils haben, der symmetrisch zu einer Mittelebene oder asymmetrisch gestaltet sein kann. Beispielsweise kann eine Seitenfläche senkrecht zur Probenkörper-Oberseite verlaufen, während eine andere schräg auf diese Seitenfläche zuläuft. Es sind auch beidseitige Schrägflächen möglich.

**[0041]** Der Probenkörper kann aus einem Substrat mit einheitlichem Substratmaterial herauspräpariert werden, so dass eine Volumenprobe entsteht. Es ist jedoch auch möglich, dass das Substrat im Bereich der Substratoberfläche eine oder mehrere durch Grenzflächen getrennte Schichten oder Schichtabschnitte bzw. Schichtsegmente aufweist. Ein typisches Beispiel für derartige Substrate sind strukturierte Halbleiterbauelemente. Die Schichten können durchgängig oder lateral strukturiert sein. Mindestens eine Grenzfläche kann im Wesentlichen parallel zur Substratoberfläche verlaufen. Alternativ oder zusätzlich kann es eine oder mehrere Grenzflächen geben, die schräg oder senkrecht zur Substratoberfläche verlaufen. In jedem dieser Fälle kann der Proben-



körper derart erzeugt werden, dass eine oder mehrere Grenzflächen im Wesentlichen senkrecht zu mindestens einer Seitenfläche des Zielabschnitts orientiert sind.

**[0042]** Die Formulierung „im Wesentlichen senkrecht“ soll hier bedeuten, dass diese Grenzfläche senkrecht oder im stumpfen Winkel, beispielsweise von weniger als  $55^\circ$  bezogen auf die Oberflächennormale, verläuft. Die Formulierung „im Wesentlichen parallel“ soll hier bedeuten, dass die Grenzfläche parallel oder im spitzen Winkel, zum Beispiel von weniger als  $45^\circ$  zur Substratoberfläche verläuft. Es bietet sich also die Möglichkeit der Querschnittsproben-Präparation, wie es schon eingangs erwähnt wurde.

**[0043]** Die Gestalt des Probenkörpers kann bei dem Verfahren zweckmäßig an eine korrespondierende Gestaltung passender Aufnahmestrukturen des Probenkörper-Halters angepasst werden. Eine besonders zuverlässige und positionsgenaue Fixierung des Probenkörpers am Probenkörper-Halter lässt sich in vielen Fällen dadurch erreichen, dass der Probenkörper derart gestaltet wird, dass zwischen dem Zielabschnitt bzw. Zwischenabschnitt und einem angrenzenden Handhabungsabschnitt ein Innenwinkel entsteht, an welchem eine Seitenfläche des Zielabschnitts bzw. Zwischenabschnitts und eine Seitenfläche des Handhabungsabschnitts unter einem Winkel, beispielsweise unter einem rechten Winkel, zusammentreffen. Dadurch kann ein definierter Anschlag zum Anbringen an korrespondierend gestalteten Aufnahmestrukturen des Probenkörper-Halters erreicht werden. Ein Innenwinkel kann ausreichen, häufig sind jedoch zwei oder mehr derartige Innenwinkel vorgesehen.

**[0044]** Das Konzept der mehrteiligen Probe bietet günstige Gestaltungsmöglichkeiten zur Auslegung des Probenkörper-Halters. Der Probenkörper-Halter kann aus einem Halter-Material gefertigt werden, welches sich vom Substratmaterial unterscheidet. Es besteht somit Freiheit bezüglich der Materialwahl für den Probenkörper-Halter, der zum Beispiel unter anderem für seine Haltefunktion und/oder für eine Funktion als Maskenelement beim Böschungsschnittverfahren unabhängig vom Substratmaterial optimiert werden kann.

**[0045]** Das Halter-Material kann nach Maßgabe einer oder mehrerer der folgenden Kriterien ausgewählt werden.

(i) Für eine zuverlässige Haltefunktion sollte der Halter eine strukturelle Integrität aufweisen, so dass es vorteilhaft sein kann, den Probenkörper-Halter aus einem einzigen Materialstück zu fertigen, auch wenn dies nicht zwingend ist.

(ii) Die Herstellung des Probenkörper-Halters sollte einerseits kostengünstig sein, andererseits sind jedoch gegebenenfalls komplexe Vorgaben hin-

sichtlich der Gestaltung des Probenhalters, beispielsweise im Bereich der Aufnahmestrukturen, einzuhalten. Die Fertigung erfolgt bei manchen Ausführungsformen daher mittels Laserstrahlbearbeitung aus einer Platte eines geeigneten Halter-Materials. In diesen Fällen sollte eine Laserbearbeitbarkeit mit hoher Präzision möglich sein. Eine Fertigung mit einem funkenerosiven Verfahren (Draht oder Stempel) ist auch möglich.

(iii) Um eine Maskenfunktion bei den weiteren Bearbeitungsschritten gemäß Schritt (e) zu gewährleisten, sollte das Halter-Material eine geringere Ionenätzrate als das Material des zugeordneten Probenkörpers aufweisen.

(iv) Weiterhin kann es zweckmäßig sein, wenn das Halter-Material gute elektrische Leitfähigkeit und/oder Wärmeleitfähigkeit aufweist.

**[0046]** Im Hinblick auf Anforderungen beim Ionenbreitstrahl-Böschungsschnittverfahren ist vorzugsweise vorgesehen, dass der Probenkörper-Halter aus einem Halter-Material gefertigt wird, welches sich vom Substratmaterial unterscheidet, wobei das Halter-Material so ausgewählt ist, dass es zumindest im Bereich der Aufnahmestrukturen bei Ionenbestrahlung eine niedrigere Abtragraten aufweist als das Substratmaterial. Hierdurch kann die Abschattungsfunktion besonders zuverlässig gewährleistet werden.

**[0047]** Es hat sich in vielen Fällen als vorteilhaft herausgestellt, wenn das Halter-Material ein Metall aufweist oder ein Metall ist. Der Begriff „Metall“ soll hier sowohl Reinmetalle als auch metallische Legierungen mit zwei oder mehr Komponenten umfassen. Derzeit wird Titan als ein geeignetes Material angesehen, welches einerseits gut bearbeitbar ist und andererseits niedrigere Ätzraten bei der Ionenbestrahlung aufweist. Alternativ kann z.B. Tantal (Ta) oder Molybdän (Mo) verwendet werden. Metallische Materialien lassen sich darüber hinaus mittels Laserstrahlbearbeitung in sehr komplexen Konfigurationen z.B. aus einer Platte, gegebenenfalls auch aus einem massiveren Ausgangsstück, herauspräparieren. Vorzugsweise wird der Probenkörper-Halter mittels Laserbearbeitung aus einer des Halter-Materials hergestellt. Ein Probenkörper-Halter kann auch durch eine aufbauende Technik, z.B. mittels 3D-Druck, oder über einen MEMS-Prozess hergestellt werden.

**[0048]** Es ist auch möglich, dass ein Probenkörper-Halter teilweise oder vollständig aus Graphit oder einer anderen Form elementaren Kohlenstoffs oder aus einem keramischen Werkstoff, wie z.B.  $Al_2O_3$ , besteht.

**[0049]** Für eine positionsgenaue Fixierung des Probenkörpers am Probenkörper-Halter hat es sich bei vielen Ausführungsformen als zweckmäßig erwiesen, wenn an einer ebenen oder nicht-ebenen Oberfläche des Probenkörper-Halters Aufnahmestrukturen

erzeugt werden, die mindestens eine Aussparung mit einer Bodenfläche und einen neben der Aussparung angeordneten Stützabschnitt mit einer gegenüber der Bodenfläche erhabenen Stützfläche aufweist, wobei die Aussparung so dimensioniert ist, dass ein Handhabungsabschnitt des Probenkörpers in die Aussparung so weit einführbar ist, bis der Zielabschnitt mit einer Seitenfläche an der Stützfläche des Stützabschnitts anschlägt. Solche Aussparungen können z.B. mittels Laserstrahlbearbeitung, Draht- oder Funkenerosion oder Ätzen erzeugt werden. Im Bereich der Aufnahmestrukturen kann der Probenkörper somit mindestens teilweise unter die Oberfläche versenkt werden, wobei eine Aussparung in der Regel einen einzigen Handhabungsabschnitt aufnimmt und die Tiefenlage des Probenkörpers in Bezug auf den Probenkörper-Halter bzw. dessen als Abschattungskante dienenden Oberfläche durch das Niveau der Stützfläche relativ zu der an die Aussparung angrenzende Oberfläche des Probenhalter-Körpers exakt vorgegeben werden kann.

**[0050]** An dem Stützabschnitt kann ein an den oben genannten Innenwinkel des Probenkörpers angepasster Außenwinkel, beispielsweise ein rechter Winkel, ausgebildet sein. Hierdurch ist beim Fixieren des Probenkörpers am Probenkörper-Halter ein definierter Flächenkontakt an zwei winklig zueinander stehenden Flächen möglich, so dass die Position des Probenkörpers bezüglich des Probenkörper-Halters zumindest in zwei zueinander senkrechten Richtungen festgelegt ist. Es kann eine weitere Anschlagsfläche quer bzw. senkrecht dazu vorgesehen sein.

**[0051]** Zum Fixieren des Probenkörpers am Probenkörper-Halter sind viele unterschiedliche Klebstoffe verwendbar. Ein Klebstoff sollte relativ schnell aushärten, aber eine gewisse Korrekturmöglichkeit beim Fixieren bieten, ausreichende Viskosität für eine gute Benetzung haben, gute thermische und elektrische Leitfähigkeit aufweisen und vakuumtauglich sein.

**[0052]** Eine einzige Aussparung kann ausreichen. Damit kann z.B. ein L-förmiger Probenkörper positionsgenau befestigt werden. Häufig sind genau zwei Aussparungen mit einem einzigen dazwischen liegenden Stützabschnitt vorgesehen. Es ist auch möglich, dass an der Oberfläche des Probenkörper-Halters ein Raster mit drei oder mehr Aussparungen mit dazwischen liegenden Stützabschnitten erzeugt wird, z.B. vier, fünf oder sechs Aussparungen. Wenn das Rastermaß und die Dimensionierung der Aussparungen und Stützabschnitte geeignet gewählt werden, können ggf. Probenkörper unterschiedlicher Größen und/oder gleichzeitig mehrere Probenkörper an dem Probenkörper-Halter angebracht werden.

**[0053]** Bei manchen Ausführungsbeispielen wird am Probenhalter-Körper eine besondere Abtragtiefen-Steuerungsstruktur zur Steuerung der am Probenkörper

erzielbaren Abtragtiefe erzeugt. Durch diese besondere Gestaltung des Probenkörper-Halters werden Prozesse ermöglicht, in welchen schadigungsarm freigelegte freie Oberflächen in mehreren zueinander versetzten Tiefenniveaus sukzessive erzeugt und zwischen den Abtragsphasen ohne Umbetten analysiert werden können.

**[0054]** Bei manchen Ausführungsformen mit Abtragtiefen-Steuerungsstrukturen wird bzw. ist an dem Probenkörper-Halter neben den Aufnahmestrukturen eine über die Oberfläche des Probenkörpers hinaus ragende gestufte Abschattungsstruktur mit Stufen unterschiedlicher Abtragdicke ausgebildet. Diese Abschattungsstruktur wirkt nach Art einer schützenden Palisade und steuert durch ihren allmählichen Abtrag im Sinne einer Opferstruktur die an dem in Strahlrichtung dahinter angeordneten Probenkörper erzielbare Abtragtiefe.

**[0055]** Bei anderen Varianten wird zur Erzeugung der Abtragtiefen-Steuerungsstruktur an der Oberfläche des Probenkörper-Halters neben den Aufnahmestrukturen durch materialabtragende Strahlbearbeitung mindestens eine Kerbe mit schräg zu der Oberfläche verlaufenden Flanken erzeugt. Dadurch entsteht eine Terrassenbildungszone neben den Aufnahmestrukturen. Beim Ionenstrahl-Böschungssätzen wird der Ionenstrahl unter streifendem Einfall schräg zu einer Verlaufsrichtung der Kerbe derart auf die Oberfläche eingestrahlt, dass der in den Aufnahmestrukturen aufgenommene Probenkörper in Einstrahlrichtung des Ionenstrahls hinter der Kerbe liegt.

**[0056]** Der Begriff „Kerbe“ bezeichnet hierbei einen von der Oberfläche in die Tiefe des Probenkörper-Halters eingebrachten Einschnitt, welcher in einer vorgebbaren Verlaufsrichtung verläuft und welcher in der Regel eine in Verlaufsrichtung gemessene Länge hat, die vielfach größer ist als die senkrecht zur Verlaufsrichtung messbare Breite der Kerbe. Eine Kerbe (notch) kann ggf. auch als Scharte bezeichnet werden. Mit dem Begriff „schräg“ wird eine Richtung oder Orientierung bezeichnet, die in einem bestimmten Winkel von einer (gedachten) Linie oder Ebene abweicht, also eine nicht-parallele Orientierung. Hierzu gehört eine senkrechte Orientierung genauso wie davon abweichende schräge Orientierungen. Eine Kerbe kann z.B. im Querschnitt eine V-Form aufweisen oder annähernd senkrecht zur Oberfläche orientierten Flanken haben.

**[0057]** Die Flanken der Kerbe können mehr oder weniger senkrecht zur Oberfläche oder in einem deutlich von 90° abweichenden schrägen Winkel dazu verlaufen und gehen im Bereich der angrenzenden Oberfläche unter Bildung einer mehr oder weniger ausgeprägten Kante in die Oberfläche über. Der Winkel zwischen Oberfläche und Flanke im Bereich der Kante kann z.B. im Bereich zwischen 90° und 75° liegen.

**[0058]** Unter den Einstrahlbedingungen des breiten Ionenstrahls kommt es innerhalb der Terrassenbildungszone zu einer Ausbildung von Terrassen, welche sich im zeitlichen Verlauf im Wesentlichen in Einstrahlrichtung des Ionenstrahls ausbreiten. Diese Topographieentwicklung resultiert nach den Erkenntnissen der Erfinder unter anderem aus unterschiedlichen Ätzraten des Probenmaterials in Abhängigkeit vom lokalen Auftreffwinkel der Ionen des Ionenstrahls im Bereich derjenigen Flanke der Kerbe, die dem Probenkörper näher liegt und die vom Ionenstrahl am Übergang zwischen Flanke und Oberfläche, also im Bereich ihrer Kante, direkt bestrahlt wird. Diese Flanke wird hier auch als „hintere Flanke“ bezeichnet, weil sie, in Strahlrichtung des Ionenstrahls betrachtet, hinter der ihr gegenüberliegenden Flanke liegt, welche weiter entfernt vom Probenkörper liegt und hier auch als „vordere Flanke“ bezeichnet wird.

**[0059]** Aufgrund des streifenden Einfalls (relativ kleiner Winkel (z.B. weniger als  $15^\circ$ ) zwischen der Oberfläche des Probenkörper-Halters und der Einstrahlrichtung des Ionenstrahls) und der Orientierung der hinteren Flanke schräg zur Oberfläche treffen die Ionen des Ionenstrahls mehr oder weniger senkrecht auf denjenigen oberen Abschnitt der hinteren Flanke, der durch die gegenüberliegende Flanke (vordere Flanke) nicht abgeschattet wird. Gleichzeitig treffen die unter streifendem Einfall eingestrahlenen Ionen unter einem sehr flachen Winkel relativ zur Oberfläche auf die Oberfläche hinter der Kerbe, also auf der dem Probenkörper zugewandten Seite der Kerbe. Bei den typischerweise stark vom Einfallswinkel abhängigen Ätzraten der Ionenstrahlbearbeitung führen diese Unterschiede der Auftreffwinkel zu einem mehrfach schnelleren Ausbreiten von Terrassen in Richtung parallel zur ursprünglichen Oberfläche, als diese in der Tiefe fortschreiten. Somit entsteht im Bereich der Kerbe eine Art Stufe in der Oberfläche in der Weise, dass die Oberfläche in Einstrahlungsrichtung gesehen hinter der Kerbe stärker abgetragen wird und damit tiefer liegt als im Bereich vor der Kerbe. Die Stufe verlagert sich mit zunehmender Bestrahlungszeit von der Kerbe weg.

**[0060]** Die Stufe kann sich in den angrenzenden Probenkörper hinein verlagern, wodurch in dem Probenkörper am tieferen Niveau der Stufe, also in einem durch die Terrassenbildungszone vorgebaren Tiefenniveau, eine freigelegte Oberfläche entsteht.

**[0061]** Die Höhe der Stufe, also der Niveauunterschied zwischen den Oberflächenbereichen vor und hinter der Kerbe, ist dabei im Wesentlichen eine Funktion des Einfallswinkels des Ionenstrahls und der in Einstrahlrichtung gemessenen effektiven Breite der Kerbe. Dabei ist die Stufenhöhe größer, je größer die effektive Breite der Kerbe am jeweiligen Ort ist. Aufgrund der Terrassenbildung im Bereich hinter einer Kerbe wird die Oberfläche im Wesentli-

chen parallel zur ursprünglichen Höhe der Oberfläche durch Ionenstrahlbearbeitung zurückgesetzt, so dass auf diese Weise ein durch die Geometrie der Anordnung exakt definierbares, gleichmäßiges Rücksetzen der Oberfläche des Probenkörper-Halters gegenüber dem ursprünglichen Niveau der Oberfläche erzielt werden kann.

**[0062]** Bei REM-Proben kann dadurch bei geeigneter Verfahrensführung erreicht werden, dass die zu beobachtende freie Oberfläche des hinter der Terrassenbildungszone angeordneten Probenkörpers im zeitlichen Verlauf stufenweise in andere Tiefenniveaus verlagert wird, so dass nacheinander am gleichen Probenkörper Oberflächen in definiert vorgebaren Tiefenniveaus freigelegt werden können.

**[0063]** Bei bevorzugten Ausführungsformen des Verfahrens wird die Kerbe durch Laserstrahlbearbeitung in die Oberfläche des Probenkörper-Halters eingebracht. Mit der Lasermikrobearbeitung steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem Kerben so eingebracht werden können, dass davon ausgehende Terrassen präzise über die Oberfläche des Probenkörper-Halters bis zum Probenkörper geleitet werden können. Alternativ ist es auch möglich, eine Kerbe mithilfe eines Ionenstrahls einzubringen, beispielsweise eines fokussierten Ionenstrahls (FIB).

**[0064]** Es kann ausreichen, wenn in die Terrassenbildungszone nur eine einzige Kerbe eingebracht wird. Häufig werden jedoch in der Terrassenbildungszone mehrere mit lateralem Abstand zueinander verlaufende Kerben erzeugt, die z.B. parallel zueinander liegen können. Der laterale Abstand kann senkrecht zur Verlaufsrichtung der Kerben gemessen werden. Durch eine Kerbenschar mit zwei oder mehr zueinander versetzt liegenden Kerben wird es möglich, durch die Ionenstrahlbearbeitung ein Vielfaches der an einer einzelnen Kerbe entstehenden Stufenhöhe zu erzeugen, wenn die Ätzzeit (Bestrahlungszeit) so gewählt wird, dass die Stufen sich über mehrere Kerben hinweg bewegen bzw. ausbreiten können. Dadurch kann eine sukzessive Absenkung einer Oberfläche um ein Vielfaches der an einer einzelnen Kerbe erzielbaren Terrassenstufenhöhe erzielt werden. Entsprechendes kann dann auch an der freizulegenden Oberfläche des Probenkörpers erreicht werden, so dass mehrere mit Abstand übereinander liegende Tiefenniveaus nacheinander freigelegt werden.

**[0065]** Die Anzahl von Kerben in der Terrassenbildungszone ist prinzipiell nicht limitiert. In der Regel wird es ausreichen, nur eine relativ geringe Anzahl von Kerben vorzusehen, beispielsweise zwei, drei, vier, fünf oder sechs Kerben.

**[0066]** Der gegenseitige Abstand zueinander versetzter Kerben, z.B. zueinander paralleler Kerben, kann als weiterer Einflussparameter zur Kontrolle des

Prozesses genutzt werden. Prinzipiell können die Stufen schneller erzeugt werden, je geringer der Abstand zwischen benachbarten Kerben ist. Andererseits kann durch zu eng liegende Kerben die Stabilität der Probe beeinträchtigt werden. Ein Abstand zwischen benachbarten Kerben, gemessen senkrecht zur generellen Verlaufsrichtung der Kerben, kann an die Breite der Kerben in dieser Richtung angepasst sein. Der Abstand kann z.B. zwischen dem Doppelten und dem Zehnfachen, insbesondere zwischen dem Doppelten bis Fünffachen der Breite einer einzelnen Kerbe liegen, ggf. auch darüber oder darunter.

**[0067]** Über die Gestalt und Dimensionierung der Kerben kann Einfluss auf den zeitlichen Ablauf des Materialabtrags genommen werden. Dabei hat beispielsweise die an der Oberfläche gemessene Breite einer Kerbe entscheidenden Einfluss auf die an der Kerbe entstehende Stufenhöhe zwischen vorgelagerter Oberfläche und nachfolgender Oberfläche. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Kerbe, z.B. mittels Laserstrahlbearbeitung, derart erzeugt wird, dass eine (an der Oberfläche gemessene) Breite der Kerbe in einem Bereich von ca. 10 µm bis ca. 50 µm liegt. Dies ergibt bei typischen Einfallswinkeln von Ionenstrahlen in kommerziellen Ionenstrahlbearbeitungsanlagen (zum Beispiel zwischen 4° und 10° bezogen auf die Oberfläche) nützliche Stufenhöhen im Bereich einiger hundert Nanometer bis einiger Mikrometer pro Kerbe. Beispielsweise wird unter der Annahme eines Ionenstrahleinfallswinkels von 80° (gemessen zur Oberflächennormalen) eine Kerbe mit einer Breite von 15 µm bei Ionenbestrahlung senkrecht zur Verlaufsrichtung der Kerbe zu einer Stufenhöhe von ca. 2,5 µm führen.

**[0068]** Insbesondere in solchen Fällen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn ein Abstand zwischen unmittelbar benachbarten Kerben im Bereich von 20 µm bis 100 µm liegt, insbesondere im Bereich von ca. 50 µm bis ca. 80 µm. Hierdurch kann ein guter Kompromiss zwischen hinreichend schneller Bearbeitungszeit und ausreichender Stabilität erzielt werden.

**[0069]** Eine Kerbe kann über ihre gesamte Länge eine (im Rahmen der prozessbedingten Schwankungen) im Wesentlichen konstante Breite aufweisen. Dies ist jedoch nicht zwingend. Bei manchen Verfahrensvarianten wird mindestens eine Kerbe erzeugt, welche eine in Verlaufsrichtung variierende Breite aufweist. Eine Kerbe kann beispielsweise eine oder mehrere lokale Verbreiterungsbereiche aufweisen oder in Draufsicht eine keilförmige Gestalt derart haben, dass sich die Breite entlang der Verlaufsrichtung kontinuierlich vergrößert oder verkleinert. Dadurch ist es möglich, entlang des Verlaufs einer Kerbe lokal unterschiedliche Abtraghöhen zu erzielen, die durch den Breitenverlauf vorgegeben werden können. Vorzugsweise sollte zwischen dieser

Kerbe und den Aufnahmestrukturen bzw. dem an diesen fixierten Probenkörper keine weitere Kerbe liegen. Dadurch können unterschiedliche Abtraghöhen besonders genau vorgegeben werden.

**[0070]** Die Erzeugung einer oder mehreren Kerben zur Erzeugung einer Terrassenbildungszone an einer als Abschattungskante dienenden Oberfläche eines Probenkörper-Halters kann unabhängig von der Gestalt des Probenkörpers und/oder des Probenkörper-Halters auch bei herkömmlichen Systemen zum Ionenstrahl-Böschungssätzen nützlich sein. Beispielsweise können Kerben an einer Schmalseite eines plattenförmigen Maskenelements der eingangs erwähnten Art (ohne gesonderte Aussparungen) vorgesehen sein. Entsprechendes gilt auch für andere Varianten von Abtragtiefen-Steuerungsstrukturen. Beispielsweise kann an einem plattenförmigen Probenkörper-Halter ohne gesonderte Aussparungen neben einer Plattenkante eine über die Oberfläche des Probenkörper-Halters hinaus ragende gestufte Abschattungsstruktur mit Stufen unterschiedlicher Abtragdicke ausgebildet sein. Diese Probenhalter können mit daran befestigten plattenförmigen Probenkörpern als Proben genutzt werden.

**[0071]** Wie bereits erwähnt kann der Probenkörper-Halter als Maskenelement in einem Böschungsschnittverfahren zur Freilegung einer Oberfläche des an dem Probenkörper-Halter fixierten Probenkörpers durch Ionenbestrahlung verwendet werden.

**[0072]** Vorzugsweise wird dabei so vorgegangen, dass der Probenkörper derart an den Aufnahmestrukturen fixiert wird, dass eine schräg oder senkrecht zur Probenkörper-Oberfläche orientierte Seitenfläche des Probenkörpers im Wesentlichen parallel zu einer als Abschattungskante vorgesehenen Oberfläche des Probenkörper-Halters orientiert ist.

**[0073]** Die Probe kann nach Fixierung des Probenkörpers an den Aufnahmestrukturen des Probenkörper-Halters in eine Probenaufnahme einer Ionenbreitstrahlanlage eingesetzt werden. Dort kann eine zu präparierende Oberfläche des Zielabschnitts durch Bestrahlung mit niederenergetischen Ionen eines Ionenbreitstrahls freigelegt werden, wobei ein an die Aufnahmestrukturen angrenzender Abschnitt des Probenkörper-Halters zur Abschattung eines Teils des Probenkörpers gegen den Ionenstrahl dient. Dies kann in der Weise erfolgen, dass durch die Lage der Oberfläche des Probenkörper-Halters die Lage der freigelegten Oberfläche des Zielabschnitts nach Abschluss der Ionenbestrahlung vorgebar ist.

**[0074]** Die Erfindung bezieht sich auch auf eine mehrteilige Probe für die Mikrostrukturdiagnostik, die durch ein Verfahren der in dieser Anmeldung beschriebenen Art hergestellt werden kann oder hergestellt wurde. Die Probe weist einen Probenkörper

per-Halter mit Aufnahmestrukturen zum Aufnehmen eines Probenkörpers in einer definierten Aufnahme-Position auf. Weiterhin weist die Probe mindestens einen gesondert von dem Probenkörper-Halter hergestellten Probenkörper auf, der mindestens einen massiven Handhabungsabschnitt und angrenzend an den Handhabungsabschnitt einen relativ zum Handhabungsabschnitt dünneren Zielabschnitt aufweist, welcher an einer Schmalseite durch eine Probenkörper-Oberseite und seitlich durch senkrecht oder schräg zur Probenkörper-Oberseite verlaufende Seitenflächen begrenzt ist. Der Probenkörper ist an den Aufnahmestrukturen in der Aufnahme-Position fixiert.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0075]** Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind.

**[0076]** Fig. 1 zeigt in den TeilFig. 1A bis Fig. 1F verschiedene Phasen beim Herauspräparieren eines Probenkörpers aus einem Substrat bei einem Ausführungsbeispiel;

**[0077]** Fig. 2 zeigt eine schrägperspektivische Ansicht eines Probenkörpers;

**[0078]** Fig. 3 und Fig. 4 zeigen einen Probenkörper-Halter in unterschiedlichen Phasen seiner Herstellung;

**[0079]** Fig. 5 zeigt den Probenkörper aus Fig. 2 nach Fixieren des Probenkörpers an einem daran angepassten Probenkörper-Halter;

**[0080]** Fig. 6 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Probenkörper-Halters mit Aufnahmestrukturen, die eine Reihe von sechs identisch dimensionierten Aussparungen in einer Rasteranordnung aufweisen und Probenkörper unterschiedlicher Dimensionen aufnehmen können;

**[0081]** Fig. 7 zeigt eine Probe mit einem Probenkörper-Halter gemäß Fig. 6, an dem mehrere Probenkörper zur gleichzeitigen Bearbeitung fixiert sind;

**[0082]** Fig. 8 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit einem Raster von Aussparungen an einer Grundfläche eines plattenförmigen Probenkörper-Halters;

**[0083]** Fig. 9 zeigt eine schematische Darstellung einer gestuften Stirnseite eines Probenkörper-Halters;

**[0084]** Fig. 10 zeigt eine schematische Schnittdarstellung einer gestuften Abschattungsstruktur zur Ab-

schattung des Probenkörpers bei Ionenstrahlbearbeitung unter flachem Winkel;

**[0085]** Fig. 11 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Probenkörper-Halters mit Aufnahmestrukturen, die eine Reihe von sechs identisch dimensionierten Aussparungen in einer Rasteranordnung aufweisen, wobei neben den Aussparungen eine Abtragtiefen-Steuerungsstruktur mit drei zueinander parallelen Kerben ausgebildet ist; und

**[0086]** Fig. 12 zeigt einen Querschnitt durch die Probe in Fig. 11 im Bereich des Probenkörpers zur Erläuterung der Wirkungsweise der Kerben der Abtragtiefen-Steuerungsstruktur.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

**[0087]** Im Folgenden werden verschiedene Aspekte eines Verfahrens zur Herstellung einer Querschnittsprobe für die Rasterelektronenmikroskopie (REM) beispielhaft beschrieben. Dabei wird aus einem gezielt ausgewählten Bereich eines Substrats SUB ein Probenkörper PK herauspräpariert, der später in einem daran angepassten Probenkörper-Halter PH befestigt wird und gemeinsam mit diesem eine Probe P für die Mikrostrukturdiagnostik mittels REM bilden soll. Ein letzter Schritt der Probenpräparation soll in einer Ionenbreitstrahlanlage im Böschungsschnittverfahren durchgeführt werden.

**[0088]** Die schematische Fig. 1 zeigt in den TeilFig. 1A bis Fig. 1F verschiedene Phasen des Herauspräparierens eines Probenkörpers aus dem Substrat SUB. In Fig. 2 ist eine schrägperspektivische Ansicht eines Probenkörpers gezeigt. Die Fig. 3 und Fig. 4 zeigen einen Probenkörper-Halter PH in unterschiedlichen Phasen seiner Herstellung. Fig. 5 zeigt den Probenkörper aus Fig. 2 beim Fixieren des Probenkörpers an einem daran angepassten Probenkörper-Halter.

**[0089]** Fig. 1A zeigt in Draufsicht einen Ausschnitt der Substratoberfläche SO eines Substrats SUB, aus welchem ein Probenkörper herauspräpariert werden soll, der einen Ausschnitt der Substratoberfläche enthält. Zur besseren Orientierung ist ein Substratkoordinatensystem SKS eingezeichnet. Das Zielvolumen ZV, dessen präparierte Oberfläche später mittels REM untersucht werden soll, grenzt in z-Richtung unmittelbar an die Substratoberfläche SO an. Die Substratoberfläche ist im Beispielsfall eben, sie kann auch gekrümmt sein. Eine Vorpräparation der Substratoberfläche ist in der Regel nicht notwendig, sie braucht beispielsweise nicht poliert zu sein. Bei dem Substrat kann es sich beispielsweise um ein mehrschichtig aufgebautes Halbleiterbauelement handeln.

**[0090]** Aus dem oberflächennahen Bereich wird durch sukzessiven Abtrag von Material mittels Laserstrahlbearbeitung sowohl unter senkrechtem als auch unter schrägem Einfall eines Laserstrahls ein weitgehend frei wählbares Probenvolumen an einer definierten Stelle freigestellt. Dazu werden zunächst Bereiche mit späteren Haltestrukturen HS1, HS2 erzeugt (**Fig. 1A**). Anschließend wird unter teilweise senkrechtem, teilweise schrägem Einfall des Laserstrahls die Grundstruktur des zu entnehmenden Probenkörpers PK freigestellt, der nur noch im Bereich der Haltestrukturen mit dem Rest des Substrats in Verbindung steht (**Fig. 1B** und **Fig. 1C**). Der bis dahin erzeugte Probenkörper-Rohling hängt nur noch im Bereich der Haltestrukturen mit dem Rest des Substrats zusammen.

**[0091]** In nachfolgenden Bearbeitungsphasen wird, ebenfalls mittels eines fokussierten Laserstrahls, ein mittlerer Abschnitt des Probenkörper-Rohlings durch weiteren Materialabtrag abgedünnt, so dass ein relativ schmaler Zielabschnitt ZA entsteht, der das Zielvolumen ZV enthält. An beiden Längsenden des Zielabschnitts bleiben strukturell massivere bzw. dickere Abschnitte übrig, in deren Bereich die Haltestrukturen mit dem Rohling des Probenkörpers in Verbindung stehen. Diese massiven Abschnitte dienen dem späteren Handling des Probenkörpers PK und werden daher in dieser Anmeldung als Handhabungsabschnitte HA1, HA2 bzw. Handlingabschnitte bezeichnet (**Fig. 1D**). Der auf diese Weise hergestellte Probenkörper ist somit durch eine geringe Dicke im Bereich des Zielvolumens, d.h. im Zielabschnitt, aber auch durch mechanisch besonders stabile Bereiche am Rand (Handhabungsabschnitte) gekennzeichnet.

**[0092]** Während der gesamten Laserbearbeitung wird der Probenkörper nur durch die beiden, an den gegenüberliegenden Handhabungsabschnitten angrenzenden Haltestrukturen HS1, HS2 gehalten, die sich zum Probenkörper hin keilförmig verjüngen und am Übergang zu den dickeren Handhabungsabschnitten jeweils eine Sollbruchstelle bilden. Durch die Halterung des Probenkörpers mittels der Haltestege ist es in diesen Phasen der Bearbeitung möglich, jegliche Bearbeitungsrückstände (Debris) der Laserbearbeitung durch Abblasen mit Druckluft oder einem anderen unter Druck stehenden Gas zu reinigen, ohne dass der Probenkörper dadurch weggeblasen wird. Die in **Fig. 1D** in Draufsicht gezeigte Konfiguration ist auch in der schrägperspektivischen Ansicht von **Fig. 2** dargestellt.

**[0093]** Es können sich weitere Bearbeitungsschritte an dem durch die Haltestrukturen im Substrat gehaltenen Probenkörper anschließen. Insbesondere kann, wie in **Fig. 1E** gezeigt ist, einer der massiven Handhabungsabschnitte noch durch Laserbearbeitung beseitigt werden, so dass der resultierende Probenkörper L-Form aufweist und nur einen ein-

zigen massiven Handhabungsabschnitt sowie daran angrenzend einen dünnen Zielabschnitt hat, wobei eine der Haltestrukturen an den Handhabungsabschnitt und die gegenüberliegende Haltestruktur am Zielabschnitt angreift. Der dadurch erzeugte Probenkörper kann dann durch weitere Laserbearbeitung im Bereich des Zielabschnitts weiter abgedünnt werden (**Fig. 1F**).

**[0094]** Der auf diese Weise lasermikrobearbeitete Probenkörper kann dann in einem weiteren Verfahrensschritt z.B. unter Nutzung einer herkömmlichen Pinzette, z.B. einer Inverspinzette, aus dem Substrat entnommen werden. Ein Bediener würde dabei nur am Handhabungsabschnitt angreifen und den dünneren Zielabschnitt nicht berühren. Der Probenkörper kann im Bereich der Sollbruchstellen an den dünnsten Stellen der Haltestrukturen HS1, HS2 aus dem Rest-Substrat herausgebrochen werden und ist dann für die weitere Handhabung frei.

**[0095]** Eine zur Durchführung der genannten Verfahrensschritte geeignete Laserbearbeitungsvorrichtung weist einen Laser, einen Galvanometer-Scanner sowie eine Fokussieroptik auf, um einen auf das Substrat gerichteten, fokussierten Laserstrahl erzeugen zu können und um den Laserstrahl entlang vorher programmierbarer Trajektorien zu führen. Auch Laserbearbeitungsvorrichtungen mit anderen Positioniereinheiten, welche eine steuerbare Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Substrat ermöglichen, können genutzt werden. Das Substrat, aus welchem der Probenkörper entnommen werden soll, wird in einer Werkstückaufnahme aufgenommen. Die Werkstückaufnahme kann bei Bedarf gegen eine Halterung zum Nachbereiten getauscht werden. Weiterhin kann die Werkstückaufnahme um eine Achse gekippt und um eine davon unabhängige Achse rotiert werden, um für jeden Auftreffort den Einfallswinkel und die Einfallrichtung des Laserstrahls frei programmierbar einstellen zu können. Außerdem kann durch x-y-Verschiebung des Substrats die Zielposition exakt in der euzentrischen Kippachse der Werkstückaufnahme positioniert werden. Die Laserbearbeitungsvorrichtung ist weiterhin mit einem Anblssystem und einem Absaugsystem ausgerüstet. Mithilfe des Anblssystems kann der aktuell mittels Laserstrahl bearbeitete Bereich angeblasen werden, um mithilfe des Druckgases entstehende Bearbeitungsrückstände fortzutragen, so dass sich diese nicht am bearbeiteten Rest des Substrats absetzen können. Mit dem Absaugsystem können die Bearbeitungsreste umweltverträglich abgesaugt werden. Weiterhin ist eine Beobachtungseinrichtung mit einer Digitalkamera vorgesehen, mit der auf wenige Mikrometer genau die jeweilige Zielstelle anvisiert werden kann. Die Programmierung und Bedienung erfolgt über eine Softwareoberfläche an einer Bedieneinheit, welche auch die zentrale Steuerung der Laserbearbeitungsvorrichtung enthält.

**[0096]** Im Zuge der Laserbearbeitung kann zur Nachverfolgbarkeit im Rahmen von QM-Systemen eine Markierung der Probenkörper-Halter etwa mit der Probenbezeichnung, fortlaufenden Nummern oder einem Matrixcode oder Barcode erfolgen. Ebenso können Referenzpositionen für die Registrierung dreidimensionaler Datensätze auf der Stirnfläche des Probenkörper-Halters mittels Laserbearbeitung angebracht werden.

**[0097]** Die anhand von **Fig. 1** beispielhaft dargestellte Bearbeitungsstrategie nutzt diese apparativen Möglichkeiten im Sinne einer schnellen und schonenden Präparation eines Probenkörpers. Ausgehend vom Substrat SUB mit unverletzter Oberfläche wird der in **Fig. 1A** gezeigte Bearbeitungszustand dadurch erreicht, dass der fokussierte Laserstrahl in den durch Laserstrahlbearbeitung zu beseitigenden Volumenbereichen mithilfe des Galvanometer-Scanners in einer mäandrierenden Trajektorie TR (oder durch eine andere scannende Bewegung, z.B. Linienvorschub) geführt wird, so dass etwa quaderförmige bzw. polygonal begrenzte Volumenbereiche VOL aus dem Substratmaterial beseitigt werden. Die (senkrecht zu den begrenzenden Seitenflächen gemessene) Breite B der Volumenbereiche entspricht einem Vielfachen der Breite einer Laserstrahl-Schnittbahn. Die Breite B kann z.B. im Bereich von 200 µm bis 1000 µm liegen. Dadurch entstehen angrenzend an die freigelegten Seitenflächen große Freiräume, die eine Reinigung mittels Freiblasens erleichtern und auch beim späteren Handling einen erleichterten Zugriff auf den zu entnehmenden Probenkörper bieten. Die weiträumige Freilegung erlaubt es, die Seitenflächen mit sehr guter Oberflächenqualität zu erzeugen. Die Bearbeitungsstrategie (z.B. mittels Mäander, Boxen, Linien etc.) hat erheblichen Einfluss auf die Qualität der freigelegten Seitenflächen. Die Seitenflächen sind in der Regel deutlich glatter als Flankenflächen einer Laserschnittbahn.

**[0098]** In dieser Phase wird mit nahezu senkrechtem Einfall des Laserstrahls gearbeitet, also mit einer Einfallrichtung des Laserstrahls etwa parallel zur Oberflächennormalen des Substrats (z-Richtung). Wenn mittels eines fokussierten Laserstrahls eine zur Probenoberfläche senkrechte Seitenfläche erzeugt werden soll, ist ein leichtes Gegenkippen (um einige Grad) vorgesehen erforderlich, um den Flankenwinkel zu kompensieren.

**[0099]** Anschließend werden die in y-Richtung einander gegenüberliegenden Seitenflächen des heraus zu präparierenden Probenkörpers herausgearbeitet, indem entsprechende rechteckförmige Volumina des Substratmaterials bei schrägem sowie senkrechtem Einfall des Laserstrahls herausgearbeitet werden. Die **Fig. 1B** und **Fig. 1C** zeigen den gleichen Bearbeitungszustand in um 90° gegeneinander verdrehten Orientierungen. In der Perspektive von **Fig. 1C**

ist gut zu erkennen, dass an den (parallel zur x-Richtung verlaufenden) Längsseiten des freizustellenden Probenkörpers mit schrägem Einfall des Laserstrahls gearbeitet wurde, um einen Probenkörper zu schaffen, welcher die Form eines asymmetrischen Prismas hat. Eine erste Seitenfläche bzw. Flankenfläche S1 verläuft dabei senkrecht zur Substratoberfläche, die gegenüberliegende ebene zweite Seitenfläche S2 verläuft schräg zur Substratoberfläche nach Art einer Hinterschneidung. Die beiden jeweils ebenen Seitenflächen S1 und S2 schneiden sich mit Abstand unterhalb der Substratoberfläche im Inneren des Substrats in einer Tiefe, die nur einem Bruchteil der Substratdicke entspricht, die senkrecht zur Substratoberfläche gemessen wird. Der Probenkörper kann also auch aus einem oberflächennahen Bereich herauspräpariert werden, ohne dass das Substrat auf gesamter Dicke durchtrennt werden muss.

**[0100]** Die in **Fig. 1C** gezeigte Situation stellt eine Zwischenstufe der Bearbeitung dar, in der der Probenkörper noch nicht seine spätere, für die Entnahme vorgesehene Gestalt erhalten hat. Anschließend wird in einem mittleren Abschnitt zwischen den äußeren Haltestrukturen der Probenkörper in y-Richtung weiter abgedünnt, indem durch Laserstrahlbearbeitung mit nahezu senkrechtem Strahleinfall Substratmaterial so beseitigt wird, dass die in **Fig. 1D** gezeigte Handtelform des Probenkörpers entsteht, welche auch in **Fig. 2** dargestellt ist. Der Probenkörper PK hat jetzt angrenzend an die erste Haltestruktur HS1 einen ersten Handhabungsabschnitt HA1, angrenzend an die gegenüberliegende zweite Haltestruktur HS2 einen zweiten Handhabungsabschnitt HA2, und zwischen den Handhabungsabschnitten einen im Vergleich dazu dünneren Zielabschnitt ZA, in welchem das Zielvolumen ZV liegt. Die in dieser Draufsicht C-förmig erscheinende Probenkörper-Oberseite PO wird dabei durch einen entsprechend geformten Ausschnitt der Substratoberfläche SO gebildet.

**[0101]** Die ebene erste Seitenfläche S1 steht senkrecht auf der Probenkörper-Oberseite und verläuft in z-Richtung des Substrats. Die gegenüberliegende Seitenfläche S3 verläuft parallel zur ersten Seitenfläche S1, so dass der Zielabschnitt ZA die Gestalt einer planparallelen Platte hat. Durch das Wegschneiden des mittleren Abschnitts zur Erzeugung der Seitenfläche S3 sind am Übergang zwischen dem Zielabschnitt ZA und den angrenzenden Handhabungsabschnitten jeweils rechtwinklige Innenwinkel IW entstanden. Die im Bereich der Innenwinkel aneinanderstoßenden ebenen Seitenflächen fungieren später beim positionsrichtigen Fixieren des Probenkörpers am zugeordneten Probenkörper-Halter als Anschlagflächen, die eine präzise Positionierung und x- und y-Richtung ermöglichen, vgl. **Fig. 3**.

**[0102]** Die schematische **Fig. 2** zeigt eine Ansicht eines Probenkörpers PK vergleichbarer Geometrie, der

aus einem Substrat herauspräpariert wurde, welches im Bereich der Substratoberseite zwei dünne Schichten L1, L2 auf einem Volumenmaterial enthielt, wobei die dünnen Schichten durch eine oberflächenparallele Grenzfläche G1 getrennt sind. Es ist erkennbar, dass der dünne Zielabschnitt ZA senkrecht zur ehemaligen Substratoberfläche ausgerichtet ist, so eine Untersuchung der Grenzfläche G1 und der angrenzenden Schichten L1, L2 in einer Beobachtungsrichtung BR möglich ist, die im Wesentlichen parallel zur Grenzfläche G1 und den angrenzenden Schichten verläuft (Pfeil). Mit dem Verfahren ist somit eine Querschnittspräparation ohne weiteres möglich.

**[0103]** Wie oben bereits erwähnt, kann der Zielabschnitt bei noch im Substrat festgehaltenem Probenkörper bereits auf eine geringe Gesamtdicke D gedünnt werden, bevor der Probenkörper aus dem Substrat herausgelöst wird.

**[0104]** Folgende typische Dimensionen von Handhabungsabschnitt und Zielabschnitt haben sich als besonders praktikabel herausgestellt. Abweichungen sind möglich. Der Zielabschnitt kann relativ dünn sein, damit die nachfolgenden Bearbeitungsschritte möglichst wenig Zeit benötigen. Gesamtdicken D bis hinunter zu ca. 100 µm oder auch darunter (z.B. bis 40 µm) scheinen regelmäßig möglich, die Mindestdicke kann materialabhängig variieren. Die in der gleichen Richtung (y-Richtung) gemessene Dicke der Handhabungsabschnitte ist meist mehrfach größer und kann ebenfalls materialabhängig optimiert werden. Sie hängt unter anderem von der Festigkeit des Substratmaterials ab. Für Silizium und andere Halbleiterwerkstoffe sollte ein Handhabungsabschnitt z.B. mindestens 200 µm dick sein, die Dicke bzw. Länge in x-Richtung kann in der gleichen Größenordnung liegen. Für Materialien mit höherer Festigkeit, wie z.B. Saphir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) können Dicken von 100 µm bis 150 µm in y-Richtung ausreichen.

**[0105]** Für das anschließende Zieldünnen bzw. Freilegen einer Oberfläche im Böschungsschnittverfahren in einer Ionenbreitstrahlanlage soll der Probenkörper PK im Beispielsfall derart im Probenkörperhalter PH gehalten werden, dass die mittels Ionenbreitstrahl freizulegende Oberfläche des Zielvolumens, nämlich die senkrecht zur Probenoberfläche PO orientierte erste Seitenfläche S1, bei eingebauter Probe im Wesentlichen parallel zur Einfallrichtung des Ionenbreitstrahls orientiert ist. „Im Wesentlichen parallel“ bedeutet in diesem Zusammenhang eine exakt parallele Ausrichtung sowie nicht-parallele Richtungen, die um maximal ca. 10° von der Parallelität abweichen.

**[0106]** Beim beschriebenen Ausführungsbeispiel wird dazu der Probenkörper PK aus dem Substrat entnommen und an einem speziell an die Probenkörper-Geometrie angepassten Probenkörperhalter

PH in einer definierten Aufnahmeposition fixiert (vgl. Fig. 5).

**[0107]** Der Probenkörper-Halter PH wird aus einer dünnen Platte eines gegen Abtrag durch Ionenstrahlen relativ resistenten Materials (z.B. Ti, Ta oder Mo) hergestellt. Diese wird z.B. mittels Laserstrahlbearbeitung, Funkenerosion oder dgl. in eine flache Quaderform mit größeren rechteckigen Grundflächen GF und dazu senkrechten, schmalen Seitenflächen gebracht. An einer der schmalen Seitenflächen, nämlich der in Fig. 3 erkennbaren Stirnfläche SF, werden mit einem geeigneten Materialabtrags-Verfahren (z.B. Lasermikrobearbeitung, Drahterosion oder Funkenerosion, Präzisionsfräsen, Ätzen) Aufnahmestrukturen AST passend zur Größe des zu montierenden Probenkörpers eingebracht. Die Aufnahmestrukturen ermöglichen es, den strukturell daran angepassten Probenkörper PK in einer bezüglich des Halter-Koordinatensystems HKS genau definierten Aufnahmeposition am Probenkörper-Halter aufzunehmen.

**[0108]** Zunächst werden dabei zwei quaderförmige Aussparungen AS1, AS2 zur Aufnahme der beiden Handhabungsabschnitte HA1, HA2 mit Abstand zueinander am Randbereich der Platte (d.h. des Probenkörper-Halters PH) präpariert (Fig. 3). Zwischen den Aussparungen verbleibt ein Steg ST, dessen Breite in x-Richtung geringer ist als die in x-Richtung gemessene lichte Weite des Probenkörpers zwischen den Handhabungsabschnitten.

**[0109]** Anschließend wird der Steg zwischen den beiden Aussparungen durch weiteren Materialabtrag abgesenkt (Fig. 4). Hierdurch entsteht zwischen den Aussparungen ein Stützabschnitt STA mit einer gegenüber der Stirnfläche SF zurückgesetzten ebenen Stützfläche STF. Die Zurücksetzungstiefe ZT ist geringer als die Dicke des Zielabschnitts ZA. Auf diese Weise wird Sorge dafür getragen, dass ein Teil des Zielabschnitts ZA unter die Stirnfläche SF versenkt und nur ein Teil des ca. 100 µm dicken Zielabschnitts des Probenkörpers über die Stirnfläche SF des Probenkörper-Halters hinausragt und durch Ionenbreitstrahlätzen abgetragen wird.

**[0110]** Es werden also an einer z.B. Oberfläche, nämlich der Stirnfläche SF des Probenkörper-Halters PH Aufnahmestrukturen AST erzeugt, die mindestens eine Aussparung AS1, AS1 mit einer Bodenfläche BF1, BF2 und einen neben der Aussparung angeordneten Stützabschnitt STA mit einer gegenüber der Bodenfläche erhobenen Stützfläche STF aufweist, wobei die Aussparung so dimensioniert ist, dass jeweils ein Handhabungsabschnitt des Probenkörpers in eine Aussparung so weit einführbar ist, bis der Zielabschnitt mit einer Seitenfläche S3 an der Stützfläche STF des Stützabschnitts STA anschlägt.



**[0111]** Die Tiefe der Aussparungen bzw. Einbuchtung, die Position der Stützfläche und die Position des Zielvolumens innerhalb des Probenkörpers PK können mit wenigen Mikrometern Genauigkeit exakt aufeinander abgestimmt werden, wodurch der abzutragende Überstand und mithin die Position der Zielstelle bis auf wenige Mikrometer festgelegt werden können. Die Fixierung des Probenkörpers PK an dem als Trägerstruktur dienenden Probenkörper-Halter erfolgt im Beispielfall mittels thermisch leitfähigen Klebers KL (vgl. **Fig. 5**). Die z.T. im rechten Winkel zueinander stehenden ausgezeichneten Kanten bzw. Flächen des Probenkörpers (z.B. Oberfläche und Übergänge von Handhabungsabschnitt zu Zielabschnitt) haben formschlüssige Entsprechungen im Probenkörper-Halter (z.B. Aussparungen, Stützabschnitt, Stützfläche)

**[0112]** Zweckmäßig können drei oder mehr Aussparungen, die vorzugsweise identisch dimensioniert sind, in einem wohldefinierten Raster mit fester Aussparungsbreite und Rasterabstand in Form eines Arrays eingebracht werden. Auf diese Weise können mit einer Version des Probenkörper-Halters verschiedene Breiten von Probenkörpern universell gehalten werden. **Fig. 6** zeigt dazu ein Ausführungsbeispiel mit sechs identisch dimensionierten Aussparungen AS1, AS6, die in gerader Reihe mit identischen Abständen bzw. Stegen ST identischer Breite zueinander liegen. Die Aussparungen sollten stets breiter als die Breite der Handhabungsabschnitte dimensioniert sein, da auf diese Weise auch Probenkörper-Längen zwischen einem Rastersprung montiert werden können. Der unten dargestellte Probenkörper PK-1 ist so dimensioniert, dass zwischen seine Handhabungsabschnitte zwei unmittelbar benachbarte Stege und die zwischen diesen liegende Aussparung passen. Die Stirnflächen der beiden Stege dienen als Stützflächen. Der Probenkörper überbrückt eine Aussparung. Der oben dargestellte Probenkörper PK-2, der in x-Richtung etwa doppelt so lang wie der untere Probenkörper PK-1 ist, ist so dimensioniert, dass zwischen seine Handhabungsabschnitte vier unmittelbar benachbarte Stege und die zwischen diesen liegenden drei Aussparung passen. Die Stirnflächen der vier Stege dienen als Stützflächen. Der Probenkörper überbrückt drei Aussparungen.

**[0113]** Ferner können mithilfe eines Rasters von vier, sechs oder mehr Aussparungen ggf. auch mehrere Probenkörper nebeneinander montiert und in einer Einspannung zeiteffizient in der Ionenstrahlätzanlage mittels Ionenbreitstrahl BIB bearbeitet werden (vgl. **Fig. 7**). Durch die Rasterstruktur von Aussparungen können somit mehrere (identisch oder unterschiedlich dimensionierte) Probenkörper nebeneinander montiert und simultan in der Ionenstrahlätzanlage bearbeitet werden.

**[0114]** Derartige Proben, also Anordnungen mit Probenkörper-Halter PH und daran befestigtem bzw. fixierten Probenkörper PK, können ohne Probleme in viele auf dem Markt befindliche Böschungsschnittanlagen montiert und abgeätzt werden. Der als Trägerstruktur dienende Probenkörper-Halter PH kann unmittelbar die Abschattungs-Funktion des Maskierungselements übernehmen bzw. als Maskierungselement verwendet werden.

**[0115]** Werden die zur Aufnahme des Probenkörpers vorgesehenen Aussparungen AS1, AS1 nicht in die schmale Stirnfläche SF, sondern die ausge dehnte Grundfläche GF eines plattenförmigen Probenkörper-Halters eingebracht (**Fig. 8**), so kann dessen Ionenpolitur auch in Standard-Breitstrahlanlagen durch Bestrahlung mittels Ionenbreitstrahl BIB unter flachem Einfallswinkel bei fortwährender azimuthaler Rotation um eine zur Plattennormalen parallele Rotationsachse ROT erfolgen. Der Probenkörper kann dabei je nach Applikation über die Oberfläche (Grundfläche GF) ragen, plan mit dieser abschließen oder aber versenkt montiert sein.

**[0116]** Bislang werden Proben für REM-Untersuchungen bei der Bearbeitung mittels Böschungsschnittverfahrens stets nur an einer einzigen Zielfläche poliert. Die Ionenpolitur wird also einmalig so weit vorgenommen, bis ein bestimmtes Niveau der freien Oberfläche erreicht ist. Anhand der **Fig. 9** und **Fig. 10** wird ein Ausführungsbeispiel erläutert, das es erlaubt, schädigungsarm freigelegte freie Oberflächen in mehreren zueinander versetzten Tiefenniveaus sukzessive zu erzeugen und zwischen den Abtragsphasen ohne Umbetten zu analysieren. Hierzu ist am Probenkörper-Halter eine besondere Abtragtiefen-Steuerungsstruktur vorgesehen.

**[0117]** Bei dem Ausführungsbeispiel wird die sukzessive Abtragung der Oberfläche S1 mit variierender Verweildauer des im Wesentlichen parallel zur Stirnfläche SF eingestrahlten Ionenbreitstrahls BIB erreicht durch eine definierte Abstufung der Stirnfläche SF des Probenkörper-Halters an einer Ioneneinstrahlseite vor den Aussparungen, die den Probenkörper PK aufnehmen. Bei der Herstellung des Probenhalters PH wird dazu neben den Aufnahmestrukturen AST eine über das Niveau der restlichen Stirnfläche des Probenkörpers hinaus ragende gestufte Abschattungsstruktur ABS mit Stufen STU unterschiedlicher Abtragdicke ABT ausgebildet. Diese Abschattungsstruktur wirkt nach Art einer schützenden Palisade. Die Stufenhöhe STH gemessen senkrecht zur restlichen Oberfläche (d.h. in y-Richtung des Halterkoordinatensystems) gibt die Niveauunterschiede der nacheinander freizulegenden Oberflächen in unterschiedlichen Tiefenniveaus TN des Probenkörpers vor.

**[0118]** Dadurch werden an ein und demselben Probenkörper Bereiche unterschiedlicher Dicke in Strahlrichtung und damit unterschiedlicher Verweildauer während des Ätzprozesses generiert. Für den dahinter abgeschatteten Probenkörper PK bedeutet dies, dass selbiger in definierten Schnittebenen (an den Tiefenniveaus TN) ohne Umbetten analysiert werden kann, sofern der Ätzprozess nach jeder abgetragenen Stufe gestoppt wird bzw. wieder fortgesetzt wird. Dieser Effekt kann durch einen asymmetrischen Probenkörper zusätzlich befördert werden. Auf diese Weise könnten z.B. mittels Elektronenrückstreuung (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) Informationen in allen drei Raumrichtungen zugänglich gemacht werden (3D-EBSD). Für den Fall eines in der Grundfläche montierten Probenkörpers (vgl. **Fig. 8**) kann analog hierzu die Oberfläche des Probenkörper-Halters an mindestens einer Seite diskret gestuft oder inkliniert sein. Für eine einseitige Palisade sollte die Ionenstrahlätzung bei Rotierender Probe dann nur in diesem Sektor erfolgen.

**[0119]** Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung einer Abtragtiefen-Steuerungsstruktur am Probenkörper-Halter wird anhand der **Fig. 11** und **Fig. 12** erläutert. An dem Probenkörper-Halter PH wurden an der ebenen Grundfläche GF neben den Aufnahmestrukturen AST durch materialabtragende Strahlbearbeitung mittels fokussiertem Laserstrahl drei zueinander parallele Kerben K1, K2, K3 mit schräg zu der Oberfläche verlaufenden Flanken (F1, F2) erzeugt. Die Breite B der Kerben an der Oberfläche GF liegt in einem Bereich von 10 µm bis 50 µm liegt. Der senkrecht zur Verlaufsrichtung der Kerben gemessene Abstand der Kerben zueinander liegt meist zwischen dem Doppelten und dem Zehnfachen, insbesondere zwischen dem Doppelten und dem Fünffachen der Breite einer einzelnen Kerbe, im Beispielfall bei etwa 100 µm bis 200 µm. Vorzugsweise sind die Kerben mindestens so lang wie die hinter ihnen montierten Probenkörper. So können Probleme mit Rückspattermaterial effektiv unterbunden werden.

**[0120]** Mithilfe der Kerben wird einer Terrassenbildungszone TBZ geschaffen, die in der geplanten Einstrahlrichtung (Pfeil) des Ionenstrahls BIB vor den Aufnahmestrukturen und dem darin fixierten Probenkörper PK liegt. Bei der Ionenstrahl-Bearbeitung wird der breite Ionenstrahl BIB unter streifendem Einfall schräg zu einer Verlaufsrichtung der Kerben derart auf die Oberfläche des Probenkörper-Halters eingestrahlt wird, dass der in den Aufnahmestrukturen aufgenommene Probenkörper PK in Einstrahlrichtung des Ionenstrahls hinter den Kerben bzw. der Terrassenbildungszone liegt.

**[0121]** Der Ionenbreitstrahl BIB wird unter streifendem Einfall eingestrahlt, was hier bedeutet, dass zwischen der Oberfläche GF des Probenkörper-Halters und der Einstrahlrichtung des Ionenstrahls nur ein re-

lativ kleiner Winkel  $W$  von beispielsweise weniger als  $15^\circ$  eingeschlossen ist. Dieser Winkel kann insbesondere im Bereich von  $1^\circ$  bis  $4^\circ$  liegen. Dieser in einer senkrecht zur Oberfläche liegenden Ebene gemessene Winkel wird hier in Anlehnung an die Verhältnisse bei der Röntgenbeugung auch als Glanzwinkel  $W$  bezeichnet. Davon zu unterscheiden ist der Ionenauffreffwinkel. Als Ionenauffreffwinkel wird hierbei derjenige Winkel bezeichnet, den die Einstrahlrichtung des Ionenstrahls mit der Normalen zur Oberfläche am Auftreffpunkt auf die jeweilige Oberfläche einschließt.

**[0122]** Im Bereich unmittelbar vor der vorderen Kante KT1 ergibt sich der Ionenauffreffwinkel als Ergänzungswinkel zu  $90^\circ$  zum Glanzwinkel  $W$ . Auf die hinteren Flanke F2 trifft der Ionenstrahl fast senkrecht auf, was bezogen auf die Normale zur hinteren Flanke einem Ionenauffreffwinkel nahe  $0^\circ$  entspricht.

**[0123]** Unter diesen Einstrahlbedingungen beobachtet man innerhalb der Terrassenbildungszone TBZ jeweils im Bereich hinter einer Kerbe eine Ausbildung einer Terrasse, welche sich, wie durch die gestrichelte Linie TER angedeutet, in Richtung etwa parallel zur Einstrahlrichtung ausbreitet. Diese Topographieentwicklung mit Stufen resultiert in erster Linie daraus, dass die Ionenätzrate bei praktisch allen relevanten Materialien in Abhängigkeit vom Ionenauffreffwinkel relativ stark variiert. Bei vielen Materialien weist die Abtragsrate bei Ionenbestrahlung im Bereich von Ionenauffreffwinkeln zwischen ca.  $50^\circ$  und ca.  $75^\circ$  ein Maximum auf und nimmt ausgehend von diesem Maximum zu kleineren und größeren Ionenauffreffwinkel-Werten in materialspezifischer Weise immer mehr ab, wobei sich häufig die Abtragsrate im Maximum um einen Faktor 2 bis 10 von der minimalen Abtragsrate unterscheidet. Beispielsweise wurde in: Völlner, B. Ziberi, F. Frost, und B. Rauschenbach, Topography evolution mechanism on fused silica during low-energy ion beam sputtering, J. Appl. Phys. 109, 043501 (2011) die Abhängigkeit der Quarzglas-Sputterabtragsrate vom Ionenauffreffwinkel bestimmt und es wurde gezeigt, dass unter den genutzten Bedingungen die maximale Ätzrate für einen Ionenauffreffwinkel von ca.  $75^\circ$  erreicht wurde. Sie nimmt zu größeren Auftreffwinkeln (bis hin zum streichenden Einfall bei  $90^\circ$ ) als auch zu kleineren Ionenauffreffwinkeln (bis hin zum senkrechten Einfall bei Ionenauffreffwinkel gleich  $0^\circ$ ) stark ab. Die Abhängigkeit der Sputterabtragsrate vom Ionenauffreffwinkel bei Silizium wurde beispielsweise in: A. Barna, Mat. Res. Soc. Proc. 254 (1992) 3–22 beschrieben. Dort liegt die maximale Ätzrate bei einem Ionenauffreffwinkel von ca.  $55^\circ$  und die Abtragsrate nimmt zu kleineren und größeren Werten deutlich ab.

**[0124]** Bei Ausführungsbeispiel wird diese Abhängigkeit in besonderer Weise genutzt. Die in **Fig. 12** anhand der Linie TER schematisch dargestellte Topographieentwicklung mit Terrassenausbildung re-

sultiert in erster Linie aus den unterschiedlichen Ätzraten im Bereich der hinteren Kante KT2, bei welcher die dem Probenkörper PK nähere hintere Flanke F2 der Kerbe K in die in Richtung Probenkörper angrenzende Oberfläche übergeht. Im Bereich dieser Kante trifft der streifend einfallende Ionenstrahl BIB nahezu senkrecht auf die hintere Flanke F2 auf, wodurch sich eine relativ hohe Abtragsrate einstellt. Im Gegensatz dazu treffen die Ionen auf die angrenzende Oberfläche relativ flach auf, d.h. in einem relativ großen Ionenaufreffwinkel (z.B. zwischen 80° und 89°) relativ zur Oberflächennormalen. Diese Unterschiede führen zu einem deutlich schnelleren Ausbreiten der Terrasse in Richtung der Probenkörpers (in **Fig. 12** nach rechts) als in die Tiefenrichtung (in **Fig. 12** nach unten). Diejenige (hintere) Kante KT2, an der die Terrassenbildung einsetzt, wird hier auch als „Initialkante“ für die Terrassenentstehung bezeichnet.

**[0125]** Die Terrassenbildung setzt sich unter andauernder Ionenbestrahlung bis in den Probenkörper PK fort, so dass in definierten diskreten Tiefenniveaus TN unterhalb der ursprünglichen Oberfläche S1 Oberflächen freigelegt werden, die dann mittels REM aus derselben Beobachtungsrichtung BR untersucht werden können.

**[0126]** Zur Größenabschätzung können folgende Überlegungen dienen. Typische Laserstrahldurchmesser können sich beispielsweise im Bereich von 10 µm bis 20 µm bewegen, so dass Kerben mit Breiten B in etwa dieser Größe mithilfe eines fokussierten Laserstrahls erzeugt werden können. Unter der Annahme eines Ionenaufreffwinkels von 89° (bezogen auf die Oberflächennormale der Oberfläche OB) bzw. eines Glanzwinkels W von ca. 1° führt eine 15 µm breite Kerbe bei Ionenbestrahlung normal zur Liniennrichtung der Kerbe zu einer Stufenhöhe ST von ca. 250 nm.

**[0127]** Es ist möglich, einen Materialabtrag um ein Vielfaches einer an einer einzelnen Kerbe erzielbaren Stufenhöhe zu erzielen. Anhand der **Fig. 12** wird der entsprechende Effekt einer sukzessiven Absenkung einer Oberfläche um ein Vielfaches einer einzelnen Terrassenstufenhöhe beispielhaft erläutert (siehe Linie TER). Dadurch entstehen die sukzessive in diskreten Tiefenniveaus TN freigelegten Oberflächen.

**[0128]** In allen Fällen können bei der Laser-Präparation des Probenkörpers zusätzliche Markierungen eingebracht werden, anhand derer die Abtragtiefe bestimmt werden kann. Die Markierungen können z.B. als Paar von schrägen Bohrlöchern ausgelegt sein, deren an der Oberfläche sichtbarer Abstand sich ändert, je weiter die Oberfläche abgetragen wird.

**[0129]** Aus der kombinierten Laserbearbeitung und Böschungsschnittätzung ergeben sich unmittelbar zahlreiche Vorteile sowohl bezogen auf die bisher-

gen Böschungsschnitt-Verfahren, als auch zur FIB-Bearbeitung. Gegenüber existierenden Böschungsschnitt-Verfahren werden u.a. folgende Vorteile gesehen:

- (i) Höhere Zielgenauigkeit von ca. 10 µm gegenüber 50–100 µm
- (ii) Deutlich schnellerer Abtrag bedingt durch geringeres Abtragsvolumen
- (iii) Bessere Wärmeableitung bzw. falls vorhanden Kühlung des Probenvolumens
- (iv) Der Probekörper kann ohne Schleifen/Sägen minimal invasiv direkt aus der Oberfläche eines Substrats präpariert werden
- (v) Es können Probenkörper von mehreren unterschiedlichen Ausgangsmaterialien in einer Präparation hergestellt werden
- (vi) Weniger Abschattung für z.B. EBSD
- (vii) Der Ansatz ist kompatibel zu allen derzeit auf dem Markt befindlichen Böschungsschnitt-Geräten

**[0130]** Im Vergleich zur FIB-Präparation werden folgende Vorzüge gesehen:

- (i) Sehr breite Probenstellen in viel kürzerer Zeit
- (ii) Kostengünstiger
- (iii) Extrem hohe Oberflächen-Güte bezogen auf Schädigung, damit auch bei Halbleitern und duktilen Metallen anwendbar
- (iv) Bessere Geometrie für analytische Techniken (z.B. für EBSD)

**ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- Völlner, B. Ziberi, F. Frost, und B. Rauschenbach, Topography evolution mechanism on fused silica during low-energy ion beam sputtering, J. Appl. Phys. 109, 043501 (2011) [0123]
- A. Barna, Mat. Res. Soc. Proc. 254 (1992) 3–22 [0123]

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Präparation einer Probe (P) für die Mikrostrukturdiagnostik, worin durch materialabtragende Laserstrahlbearbeitung aus einem Substrat ein Probenkörper (PK) mit vorgebbare Gestalt präpariert und anschließend ein Zielabschnitt (ZA) des Probenkörpers mittels Laserstrahlbearbeitung und/oder Ionenstrahlbearbeitung zur Freilegung eines für eine Mikrostrukturuntersuchung geeigneten Zielvolumens (ZV) weiterbearbeitet wird, mit folgenden Schritten:

(a) Freistellen des Probenkörpers (PK) aus dem Substrat mittels mindestens einer Laserbearbeitungsoperation durch Einstrahlen mindestens eines Laserstrahls senkrecht und/oder schräg zu einer Substratoberfläche (SO) derart, dass ein Probenkörper entsteht, welcher an einer Probenkörper-Oberseite (PO) durch einen Bereich der Substratoberfläche sowie seitlich durch schräg oder senkrecht zu der Substratoberfläche orientierte Seitenflächen (S1, S2, S3) begrenzt ist,

wobei eine Gestalt des Probenkörpers erzeugt wird, die mindestens einen massiven Handhabungsabschnitt (HA, HA1, HA2) und angrenzend an den Handhabungsabschnitt einen relativ zum Handhabungsabschnitt dünneren Zielabschnitt (ZA) aufweist, welcher an einer Schmalseite durch die Probenkörper-Oberseite (PO) und seitlich durch die senkrecht oder schräg zur Probenkörper-Oberseite verlaufende Seitenflächen (S1, S3) begrenzt ist;

(b) Herstellen eines von dem Probenkörper gesonderten Probenkörper-Halters (PH), der an die Gestalt des Probenkörpers angepasste Aufnahmestrukturen zum Aufnehmen des Probenkörpers in einer definierten Aufnahmeposition aufweist;

(c) Entnehmen des freigestellten Probenkörpers aus dem Substrat;

(d) Fixieren des aus dem Substrat entnommenen Probenkörpers an den Aufnahmestrukturen des Probenkörper-Halters;

(e) Durchführen mindestens einer weiteren materialabtragenden Bearbeitung mindestens einer Seitenfläche des Probenkörpers im Bereich des Zielabschnitts mittels Ionenstrahlbearbeitung zur Freilegung des Zielvolumens.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper (PK) an den Aufnahmestrukturen (AST) durch Kleben befestigt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein erster Handhabungsabschnitt (HA1) und ein zweiter Handhabungsabschnitt (HA2) erzeugt werden, wobei zwischen dem ersten Handhabungsabschnitt und dem zweiten Handhabungsabschnitt ein dünnerer Zwischenabschnitt liegt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim

Schritt (a) des Freistellens an mindestens einer Stelle einer Seitenfläche des Handhabungsabschnitts eine Haltestruktur (HS) aus Substratmaterial verbleibt, welche den ansonsten freigestellten Probenkörper im Bereich des Handhabungsabschnitts (HA) mit einem angrenzenden Abschnitt des Substrats (SUB) verbindet, so dass der Probenkörper (PK) nur über die Haltestruktur mit dem Rest des Substrats verbunden ist, wobei vorzugsweise im Schritt (c) das Entnehmen des Probenkörpers eine Trennung der Verbindung zwischen dem Probenkörper und dem Substrat im Bereich der Haltestruktur bewirkt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Schritt (a) des Freistellens angrenzend an mindestens eine der Seitenflächen bei der Laserstrahlbearbeitung ein Volumenbereich (VOL) aus Substratmaterial beseitigt wird, welcher senkrecht zu der Seitenfläche eine Breite (B) aufweist, die ein Vielfaches der Breite einer Laserstrahl-Schnittbahn aufweist, wobei vorzugsweise die Breite (B) des Volumenbereichs bei 200 µm oder mehr, insbesondere im Bereich von 300 µm bis 1000 µm, liegt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Volumenbereich (VOL) sukzessive durch scannende Führung eines fokussierten Laserstrahls beseitigt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Schritt (a) des Freilegens der Probenkörper derart erzeugt wird, dass eine senkrecht zur Substratoberfläche gemessene Ausdehnung des Probenkörpers (PK) geringer ist als eine senkrecht zur Substratoberfläche gemessene Dicke des Substrats (SUB), wobei vorzugsweise beim Schritt (a) des Freilegens in einem Zwischenschritt mittels Laserstrahlbearbeitung zwei in einem Winkel zueinander stehende, gegenüber liegende Seitenflächen (S1, S2) erzeugt werden, welche sich in einer im Inneren des Substrats liegenden Schnittlinie schneiden.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat im Bereich der Substratoberfläche eine oder mehrere durch Grenzflächen (G1) getrennte Schichten (L1, L2) oder Schichtsegmente aufweist, wobei der Probenkörper derart erzeugt wird, dass eine oder mehrere Grenzflächen im Wesentlichen senkrecht zu mindestens einer Seitenfläche (S3) des Zielabschnitts (ZA) orientiert ist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper (PK) derart gestaltet wird, dass zwischen dem Zielabschnitt (ZA) und einem angrenzenden Handhabungsabschnitt (HA1, HA2) ein Innenwinkel (IW) entsteht, an welchem eine Seitenfläche (S3) des

Zielabschnitts und eine Seitenfläche des Handhabungsabschnitts (HA1, HA2) unter einem Winkel, insbesondere unter einem rechten Winkel, zusammen treffen.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass beim Fixieren des Probenkörpers (PK) am Probenkörper-Halter (PH) ein definierter Flächenkontakt an zwei winklig zueinander stehenden Flächen erzeugt wird, so dass die Position des Probenkörpers bezüglich des Probenkörper-Halters zumindest in zwei zueinander senkrechten Richtungen festgelegt ist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper-Halter (PH) aus einem Halter-Material gefertigt wird, welches sich vom Substratmaterial unterscheidet, wobei das Halter-Material so ausgewählt ist, dass es zumindest im Bereich der Aufnahmestrukturen bei Ionenbestrahlung eine niedrigere Abtragrate aufweist als das Substratmaterial.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Halter-Material ein Metall aufweist oder ein Metall ist, insbesondere Titan oder Tantal oder Molybdän.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper-Halter (PH) mittels Laserbearbeitung aus einer Platte eines Halter-Materials hergestellt wird.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass an einer Oberfläche des Probenkörper-Halters Aufnahmestrukturen (AST) erzeugt werden, die mindestens eine Aussparung (AS1, AS2, AS6) mit einer Bodenfläche (BF1, BF2) und einen neben der Aussparung angeordneten Stützabschnitt (STA) mit einer gegenüber der Bodenfläche erhabenen Stützfläche (STF) aufweist, wobei die Aussparung so dimensioniert ist, dass ein Handhabungsabschnitt (HA1, HA2) des Probenkörpers (PK) in die Aussparung so weit einführbar ist, bis der Zielabschnitt (ZA) mit einer Seitenfläche (S3) an der Stützfläche (STF) des Stützabschnitts anschlägt.

15. Verfahren nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass an dem Stützabschnitt mindestens ein an den Innenwinkel (IW) des Probenkörpers angepasster Außenwinkel ausgebildet ist derart, dass beim Fixieren des Probenkörpers (PK) am Probenkörper-Halter (PH) ein definierter Flächenkontakt an zwei winklig zueinander stehenden Flächen erzielbar ist, so dass die Position des Probenkörpers bezüglich des Probenkörper-Halters zumindest in zwei zueinander senkrechten Richtungen festgelegt ist.

16. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Oberfläche des Probenkörper-Halters (PH) genau zwei Aussparungen (AS1, AS2) erzeugt werden.

17. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Oberfläche des Probenkörper-Halters (PH) ein Raster mit drei oder mehr Aussparungen mit dazwischen liegenden Stützabschnitten erzeugt wird, insbesondere vier, fünf oder sechs Aussparungen, wobei ein Rastermaß und eine Dimensionierung der Aussparungen und Stützabschnitte so gewählt wird, dass Probenkörper unterschiedlicher Größen und/oder gleichzeitig mehrere Probenkörper an dem Probenkörper-Halter fixierbar sind.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass am Probenkörper-Halter (PH) eine Abtragtiefen-Steuerungsstruktur (ABS, K1, K2) zur Steuerung der am Probenkörper (PK) erzeugbaren Abtragtiefe erzeugt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass an dem Probenkörper-Halter (PH) neben den Aufnahmestrukturen (AST) eine über die Oberfläche des Probenkörpers hinaus ragende gestufte Abschattungsstruktur (ABS) mit Stufen (STU) unterschiedlicher Abtragdicke (ABT) ausgebildet ist, wobei die gestufte Abschattungsstruktur bei der Ionenbestrahlung als Abtragtiefen-Steuerungsstruktur fungiert.

20. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Erzeugung einer Terrassenbildungszone an dem Probenkörper-Halter (PH) neben den Aufnahmestrukturen (AST) durch materialabtragende Strahlbearbeitung mindestens eine Kerbe (K1, K2) mit schräg zu der Oberfläche verlaufenden Flanken (F1, F2) erzeugt wird, und dadurch, dass der Ionenstrahl bei der Ionenstrahl-Bearbeitung unter streifendem Einfall schräg zu einer Verlaufsrichtung der Kerbe derart auf die Oberfläche des Probenkörper-Halters (PH) eingestrahlt wird, dass der in den Aufnahmestrukturen aufgenommene Probenkörper (PK) in Einstrahlrichtung des Ionenstrahls hinter der Kerbe liegt.

21. Verfahren nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kerbe (K1, K2) durch Laserstrahlbearbeitung in die Oberfläche (GF) des Probenkörper-Halters (PH) eingebracht wird und/oder dass die Kerbe (K) derart erzeugt wird, dass eine Breite an der Oberfläche in einem Bereich von 10 µm bis 50 µm liegt.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Terrassenbildungszone (TBZ) mehrere mit Abstand (A) zueinander verlaufende Kerben (K1, K2) erzeugt wer-

den, insbesondere zueinander parallel verlaufende Kerben, wobei vorzugsweise in der Terrassenbildungszone (TBZ) zwei, drei, vier, fünf oder sechs mit Abstand zueinander angeordnete Kerben erzeugt werden.

23. Verfahren nach Anspruch 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Abstand (A) zwischen benachbarten Kerben an die Breite der Kerben (K1, K2) derart angepasst ist, dass der Abstand zwischen dem Doppelten und dem Zehnfachen, insbesondere zwischen dem Doppelten und dem Fünffachen der Breite einer einzelnen Kerbe liegt.

24. Verfahren nach Anspruch 22 oder 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kerben derart erzeugt werden, dass der Abstand zwischen unmittelbar benachbarten Kerben im Bereich von 20 µm bis 100 µm liegt.

25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper-Halter (PH) als Maskenelement in einem Böschungsschnittverfahren zur Freilegung einer Oberfläche (S1) des an dem Probenkörper-Halter fixierten Probenkörpers (PK) durch Ionenbestrahlung verwendet wird.

26. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Probenkörper (PK) derart an den Aufnahmestrukturen (AST) fixiert wird, dass eine schräg oder senkrecht zur Probenkörper-Oberfläche (PO) orientierte Seitenfläche (S1) des Probenkörpers im Wesentlichen parallel zu einer als Abschattungskante vorgesehenen Oberfläche (SF) des Probenkörper-Halters (PH) orientiert ist.

27. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Probe (P) nach Fixierung des Probenkörpers (PK) an den Aufnahmestrukturen des Probenkörper-Halters (PH) in eine Probenaufnahme einer Ionenbreitstrahlanlage eingesetzt wird und eine zu präparierende Oberfläche (S1) des Zielabschnitts (ZA) durch Bestrahlung mit niederenergetischen Ionen eines Ionenbreitstrahls freigelegt wird, wobei ein an die Aufnahmestrukturen angrenzender Abschnitt des Probenkörper-Halters (PH) zur Abschattung eines Teils des Probenkörpers (PK) gegen den Ionenstrahl dient.

28. Probe für die Mikrostrukturdiagnostik, insbesondere erhältlich oder erhalten durch ein Verfahren mit den Merkmalen von mindestens einem der Ansprüche 1 bis 27, mit:  
einem Probenkörper-Halter (PH) mit Aufnahmestrukturen zum Aufnehmen eines Probenkörpers in einer definierten Aufnahmeposition; und  
mindestens einem gesondert von dem Probenkörper-Halter hergestellten Probenkörper (PK), welcher

mindestens einen massiven Handhabungsabschnitt (HA, HA1, HA2) und angrenzend an den Handhabungsabschnitt einen relativ zum Handhabungsabschnitt dünneren Zielabschnitt (ZA) aufweist, der an einer Schmalseite durch eine Probenkörper-Oberseite (PO) und seitlich durch senkrecht oder schräg zur Probenkörper-Oberseite verlaufende Seitenflächen (S1, S3) begrenzt ist,  
wobei der Probenkörper an den Aufnahmestrukturen in der Aufnahmeposition fixiert ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

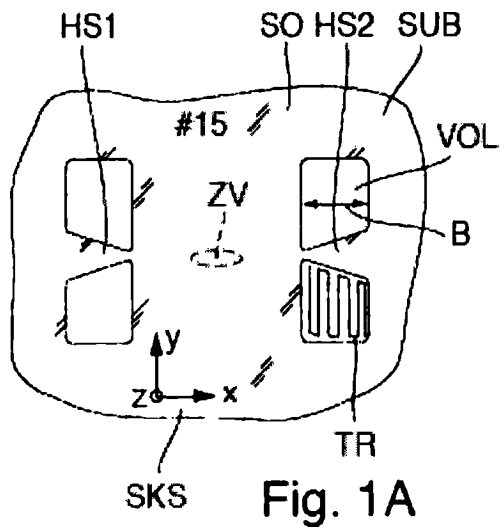


Fig. 1A

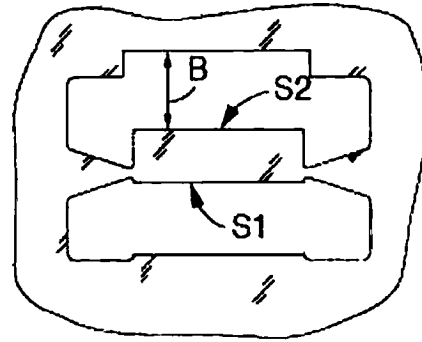


Fig. 1B

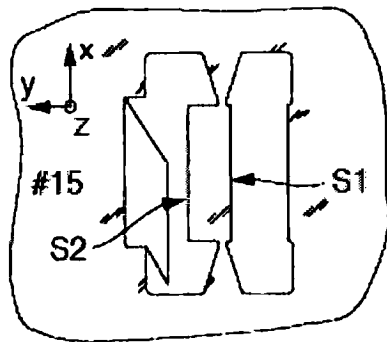


Fig. 1C

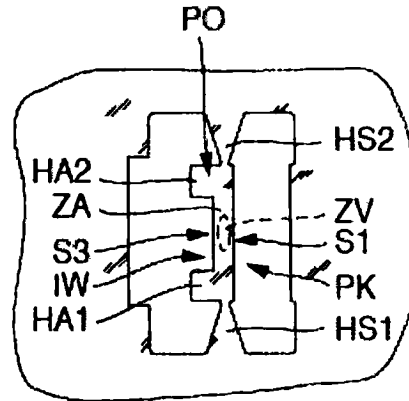


Fig. 1D

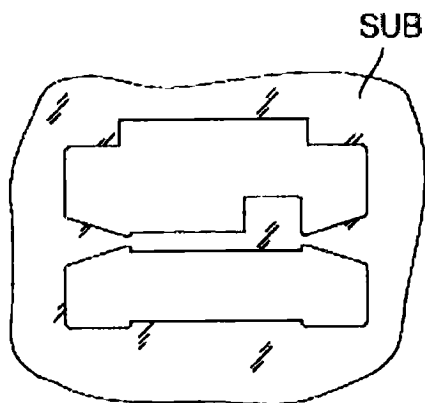


Fig. 1E

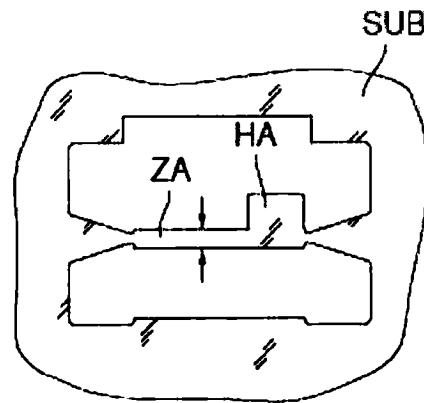
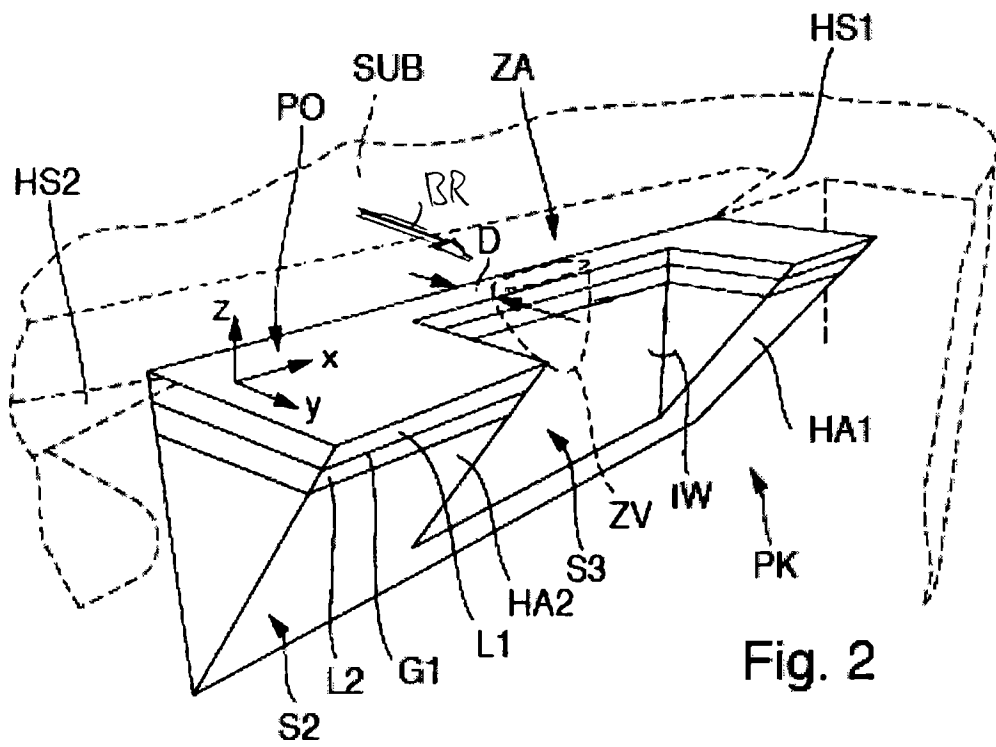


Fig. 1F





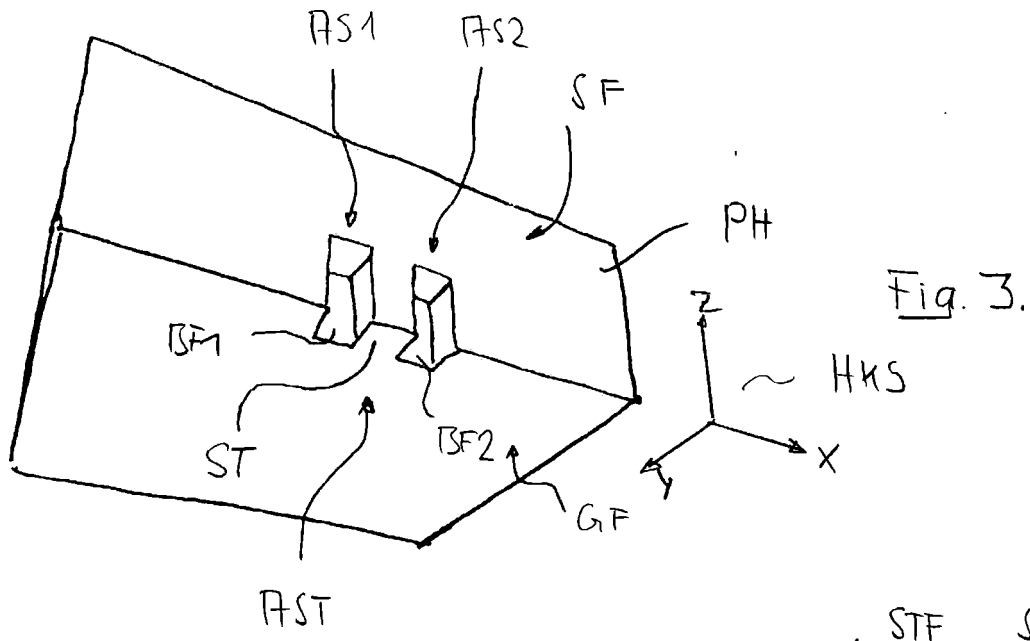


Fig. 4

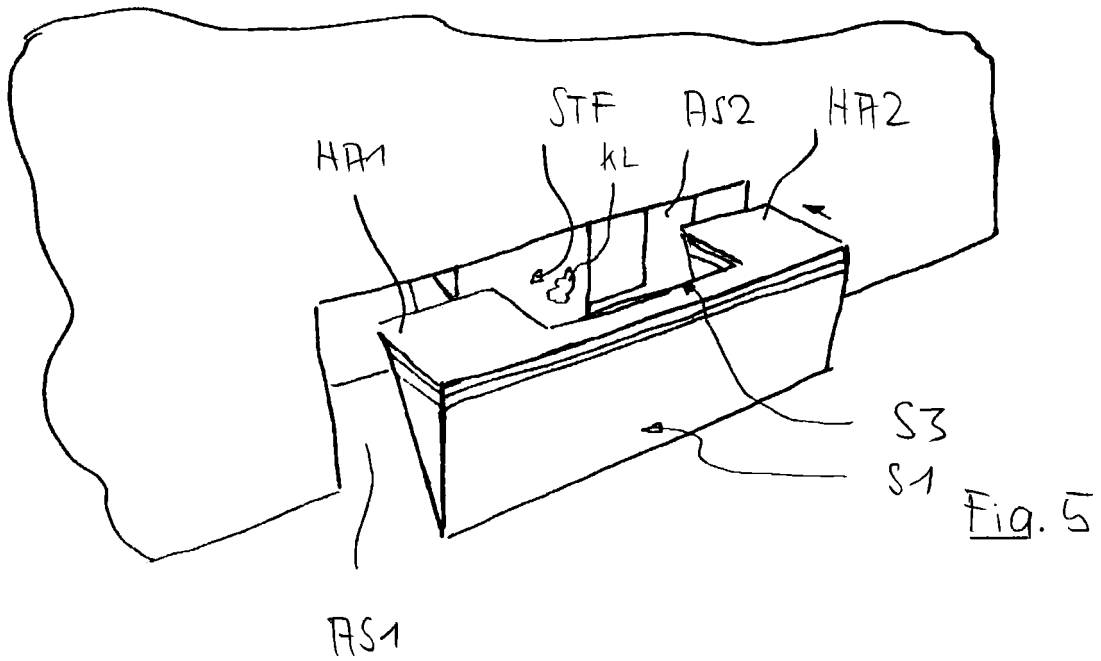
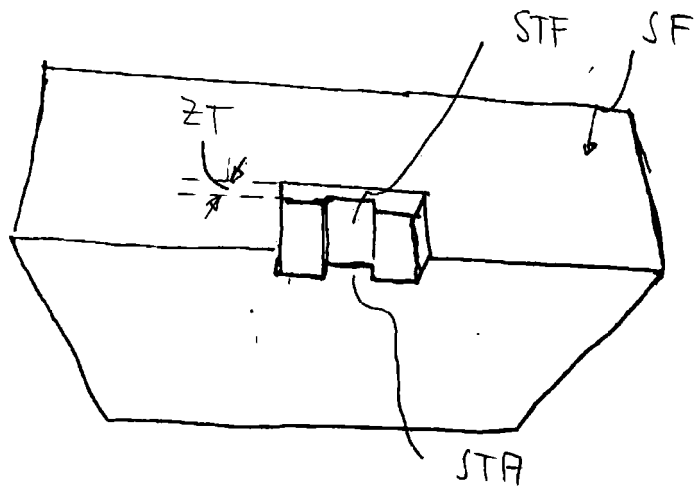


Fig 6

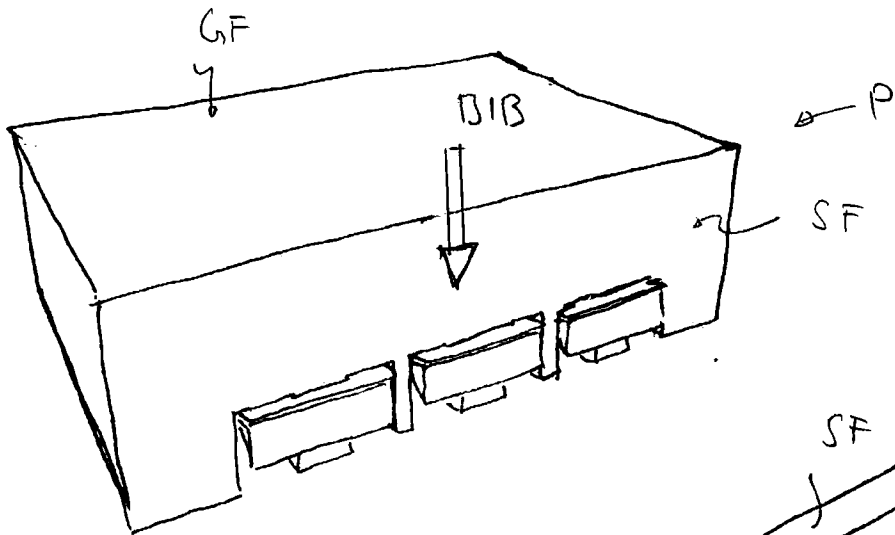
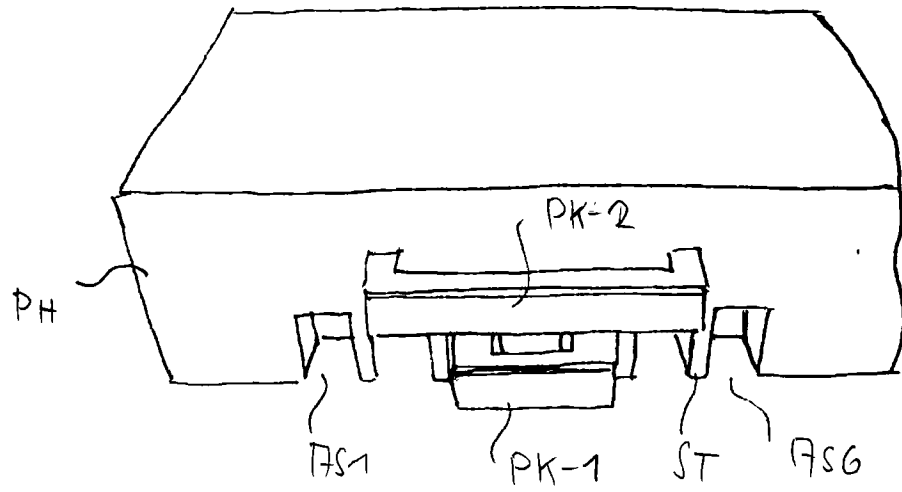
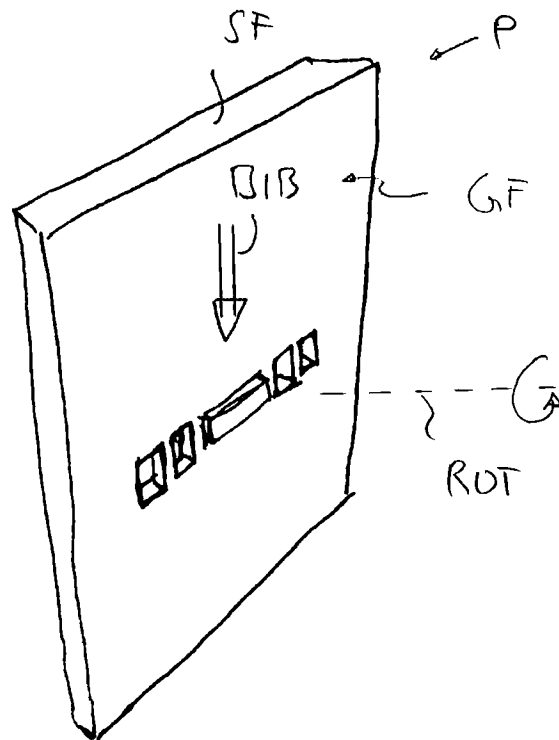


Fig.7

Fig. 8



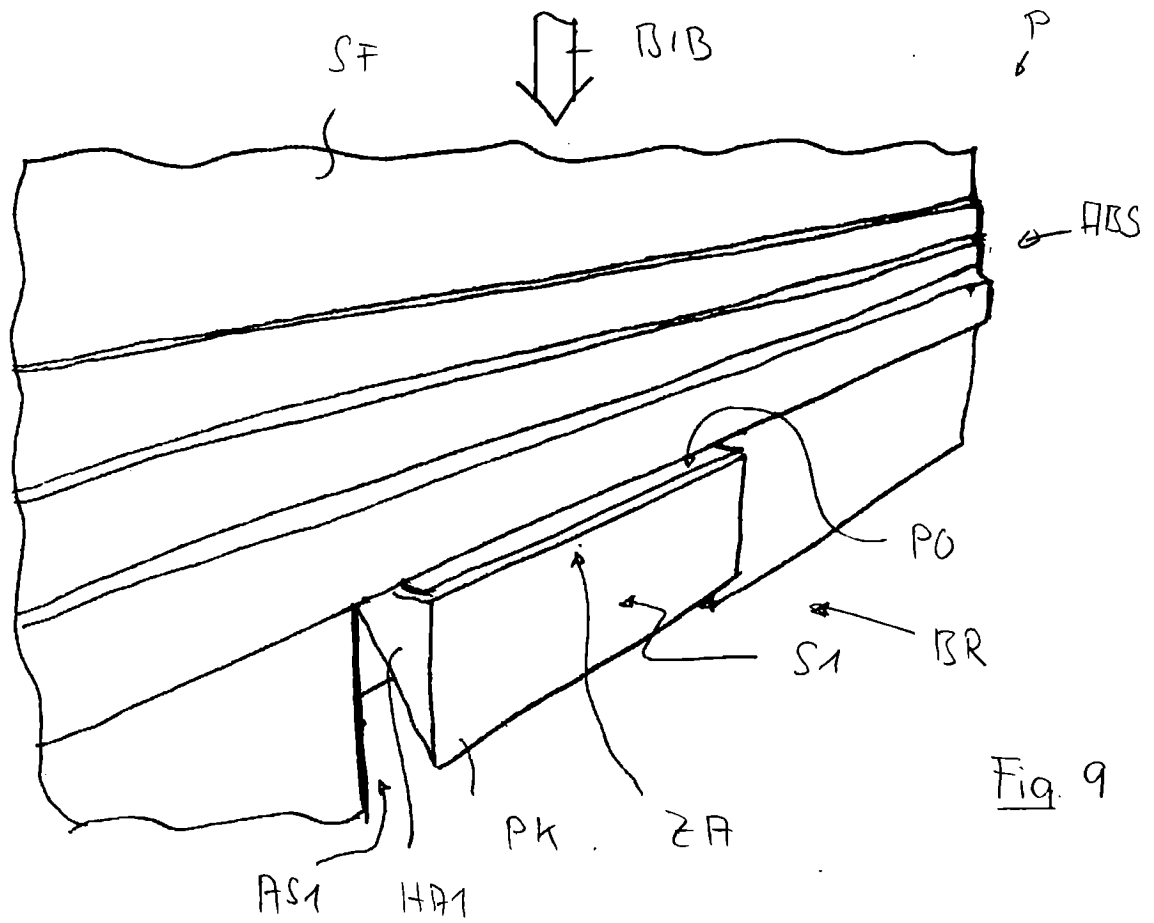


Fig. 9

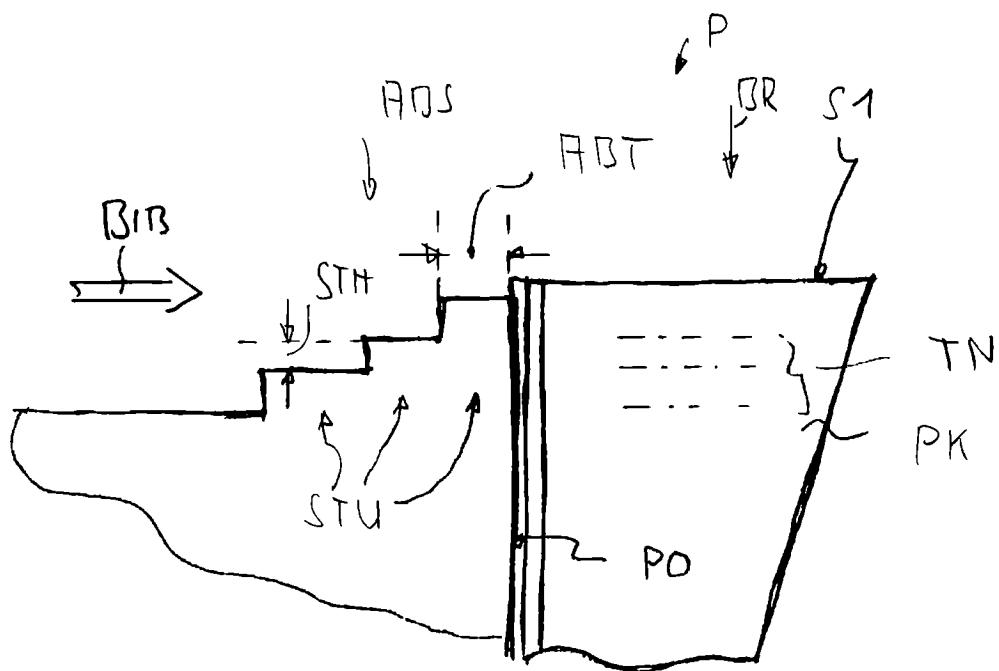


Fig. 10

Fig. 11

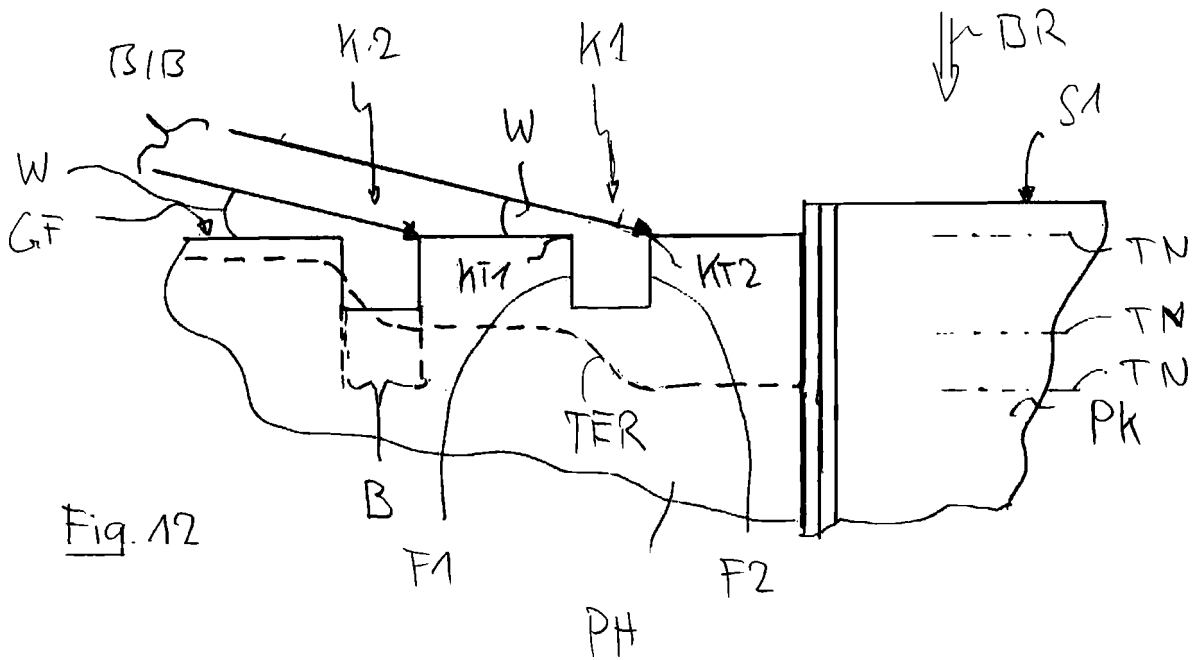
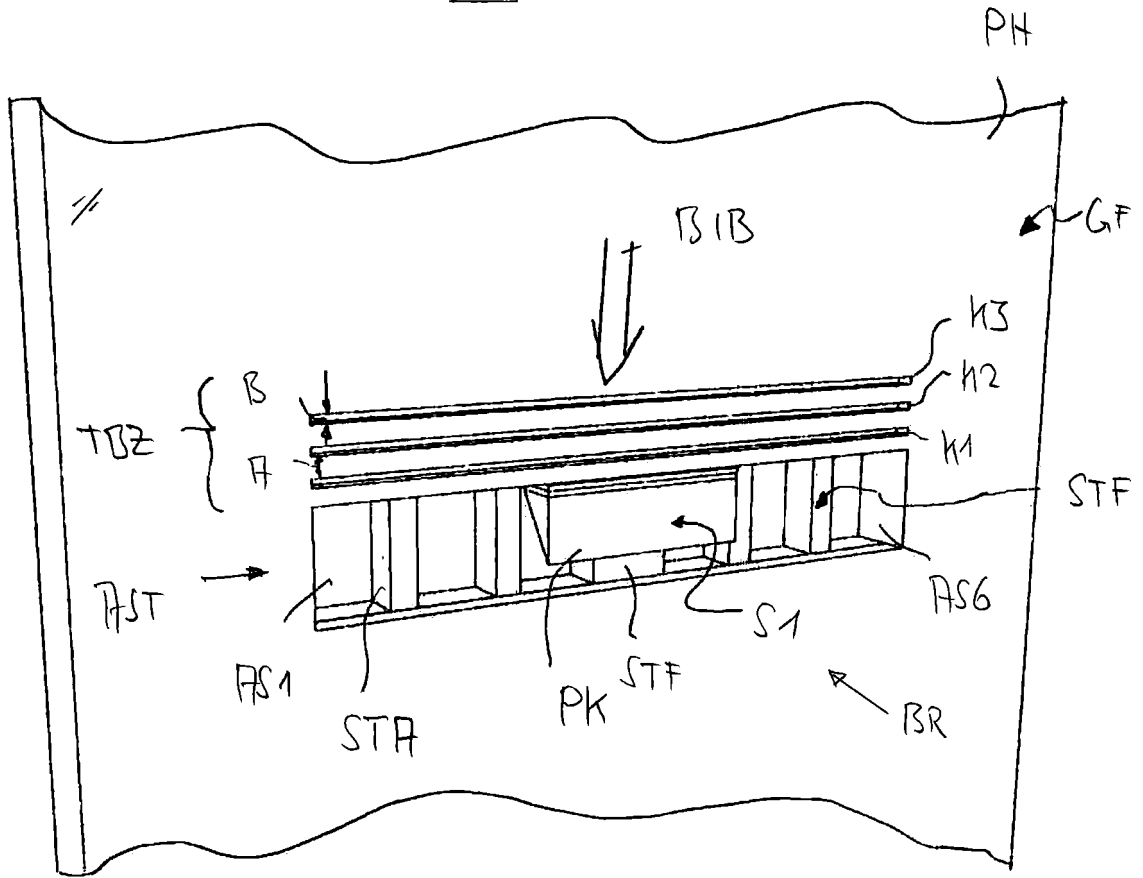


Fig. 12