



(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 201 741.9**

(22) Anmeldetag: **02.02.2015**

(43) Offenlegungstag: **04.08.2016**

(51) Int Cl.: **G02B 5/18 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Siemens Healthcare GmbH, 91052 Erlangen, DE**

(72) Erfinder:

**Freudenberger, Jörg, 90562 Kalchreuth, DE;  
Hedler, Harry, 82110 Germering, DE; Leghissa,  
Martino, 91369 Wiesenthau, DE; Zapf, Jörg, 81927  
München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**US 2007 / 0 183 583 A1**

**US 2011 / 0 052 800 A1**

**US 2012 / 0 002 785 A1**

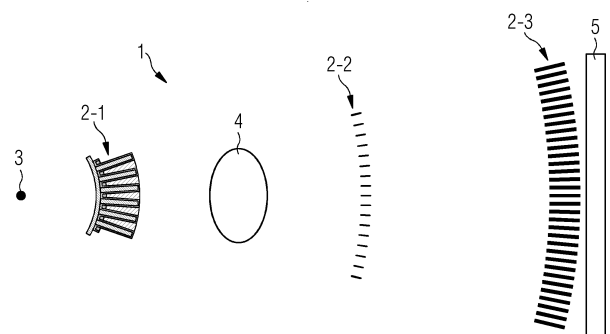
**US 2014 / 0 270 060 A1**

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Phasenkontrastgitter und Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung schafft ein Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Phasenkontrastgitters. Das Phasenkontrastgitter weist dabei eine Form auf, die senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Strahlung in den Gitterinterferometer zumindest in eine Richtung gekrümmt ist. Zur Stabilisierung des Phasenkontrastgitters können die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen mit einem Füllmaterial verfüllt werden. Die Herstellung eines solchen Phasenkontrastgitters kann durch Ätzen der negativen Struktur in ein Basismaterial, wie zum Beispiel einen Silizium-Wafer, erfolgen. Die so entstandene negative Struktur kann mit geeignetem Material verfüllt werden, um Gitterlamellen des Phasenkontrastgitters zu bilden. Die dabei gewonnene Gitterlamellenstruktur kann gekrümmt und anschließend durch Verfüllen mit dem Füllmaterial stabilisiert werden. Auf diese Weise kann die Ausrichtung der Gitterlamellen eines Phasenkontrastgitters an die Strahlausbreitungsrichtung in dem Gitterinterferometer angepasst werden.



**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Phasenkontrastgitter und ein Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung ein Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer.

## Stand der Technik

**[0002]** Zur bildgebenden Diagnostik mittels Röntgenstrahlen sind beispielsweise gitterbasierte Interferometer bekannt, die den Talbot-Effekt zur Bildgebung nutzen. Diese Interferometer ermöglichen eine Verbesserung des Kontrastes mittels Einbeziehung der Informationen der von einem Untersuchungsobjekt verursachten Phasenverschiebung der Strahlung. Für das sogenannte Talbot-Lau-Verfahren werden dazu bis zu drei Gitter **200-i** benötigt. das erste und dritte Gitter **200-1**, **200-3** (auch als G0 bzw. G2 Gitter bezeichnet) bestehen dabei jeweils aus einer Abfolge eines stark und eines schwach die Röntgenstrahlung absorbierenden Materials. Das mittlere Gitter **200-2** (G1 Gitter) weist darüber hinaus in der Regel einen definierten Phasenschub zwischen den beiden verwendeten Materialien für Gitterlamellen bzw. Zwischenräume auf, wobei die beiden Materialien vorzugsweise möglichst wenig Strahlung absorbieren.

**[0003]** Die Druckschrift DE 10 2010 017 425 A1 offenbart beispielsweise spezielle Gitter bzw. Gitteranordnungen für Phasengittern von Interferometern. Dabei weisen die beschriebenen Gitterinterferometer eine geneigte Phasengitterstruktur auf.

**[0004]** Fig. 7 zeigt ein konventionelles Gitterinterferometer **100**. Ein solches Gitterinterferometer **100** umfasst neben den drei Phasengittern **200-i** eine zumindest annähernd punktförmige Strahlungsquelle **3** sowie einen Detektor **5**. Zwischen dem ersten Gitter **200-1** und dem zweiten Gitter **200-2** kann dabei die zu untersuchende Probe **4** angeordnet werden. Konventionelle Fertigungsverfahren erlauben dabei in der Regel jedoch nur planare Gitterstrukturen mit parallel verlaufenden Gitterlamellen. Da die Strahlungsquelle **3** nahezu punktförmig ist, emittiert sie eine gekrümmte Wellenfront, die dann bei konventionellen Gitterinterferometern auf ein planares Phasengitter trifft. Dies führt zu einer verminderten Bildqualität eines mittels eines derartigen Gitterinterferometers generierten Bildes.

**[0005]** Es besteht daher ein Bedarf nach einem verbesserten Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer. Insbesondere besteht ein Bedarf nach einem Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer, das an die Strahlungsrichtung der in dem Gitterinterferometer verwendeten Strahlung angepasst ist.

Darüber hinaus besteht Bedarf nach einem Verfahren zur Herstellung eines solchen Phasenkontrastgitters.

## Offenbarung der Erfindung

**[0006]** Gemäß einem Aspekt schafft die vorliegende Erfindung hierzu ein Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer mit einer Mehrzahl von Gitterlamellen, die in Form eines zylinderförmigen oder kugelförmigen Segments angeordnet sind.

**[0007]** Gemäß einem weiteren Aspekt schafft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters für ein Gitterinterferometer. Das Verfahren umfasst die Schritte des Bereitstellens eines planaren Phasenkontrastgitters mit einer Mehrzahl von Gitterlamellen und des Biegens des bereitgestellten planaren Phasenkontrastgitters zu einem zylinderförmigen oder kugelförmigen Segment.

## Vorteile der Erfindung

**[0008]** Eine Idee der vorliegenden Erfindung besteht darin, die Gitterlamellen des Phasenkontrastgitters eines Gitterinterferometers an die Strahlausbreitungsrichtung der in dem Gitterinterferometer verwendeten Strahlung anzupassen. Hierdurch können die die Röntgenstrahlung absorbierenden Gitterlamellen möglichst parallel zu der Strahlausbreitungsrichtung in dem Gitterinterferometer ausgerichtet werden. Auf diese Weise kann die Qualität eines Bildes, das aus den Signalen eines Gitterinterferometers mit einem erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitter generiert wurde, gesteigert werden.

**[0009]** Durch das Ausfüllen der Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen des erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitters kann die Ausrichtung der Gitterlamellen stabilisiert bzw. fixiert werden. Auf diese Weise kann eine nachträgliche Verformung des Phasenkontrastgitters verhindert werden. Somit kann die vorgegebene Krümmung des Phasenkontrastgitters erhalten bleiben.

**[0010]** Durch die Anordnung der Gitterlamellen in Form eines Segments der Mantelfläche eines Zylinders kann dabei bereits eine sehr gute Anpassung der Gitterlamellen an die Strahlausbreitungsrichtung der verwendeten Röntgenstrahlung erreicht werden. Vorzugsweise wird dabei die Krümmung der zylinderförmigen Mantelfläche so gewählt, dass sich eine Strahlungsquelle eines Gitterinterferometers auf der Mittelachse des Zylinders befindet.

**[0011]** Durch die Anordnung der Gitterlamellen in Form eines Segments einer Kugeloberfläche kann darüber hinaus die Ausrichtung der Gitterlamellen des erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitters noch zusätzlich erhöht werden.

**[0012]** Gemäß einer Ausführungsform sind die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen mit einem Füllmaterial gefüllt sind.

**[0013]** Durch das Ausfüllen der Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen kann die gekrümmte Struktur des Gitters stabilisiert werden.

**[0014]** Gemäß einer Ausführungsform umfassen die Gitterlamellen ein Gittermaterial mit Gold, Silber, Blei, Indium, Bismut, Zinn, Zink und/oder Kupfer. Weiterhin können die Gitterlamellen ein Gittermaterial mit einer Verbindung aus den zuvor angeführten Elementen umfassen.

**[0015]** Gitterlamellen mit den zuvor genannten Elementen oder Verbindungen weisen einen hohen Röntgenschwächungskoeffizienten auf. Darüber hinaus ist der Schmelzpunkt der angeführten Elemente bzw. Verbindungen dieser Elemente relativ niedrig, so dass die Materialien für die Herstellung des erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitters leicht geschmolzen und verarbeitet werden können. Daher sind die angeführten Elemente bzw. Verbindungen für das Gittermaterial der Gitterlamellen besonders geeignet.

**[0016]** Gemäß einer Ausführungsform weist das Material der Gitterlamellen einen Schmelzpunkt von maximal 900 °C auf. Insbesondere kann der Schmelzpunkt des Materials der Gitterlamellen zwischen 500 °C und 900 °C liegen.

**[0017]** Materialien mit einem solchen Schmelzpunkt, insbesondere einem Schmelzpunkt von weniger als 900 °C, können dabei in einem flüssigen Zustand verarbeitet werden, ohne dass dabei die anderen Bestandteile während des Fertigungsprozesses beeinträchtigt werden.

**[0018]** Gemäß einer Ausführungsform weist das Füllmaterial einen Röntgenschwächungskoeffizienten auf, der von dem Röntgenschwächungskoeffizienten des Gittermaterials der Gitterlamellen verschieden ist. Insbesondere unterscheiden sich die Röntgenschwächungskoeffizienten von Füllmaterial und Gittermaterial der Gitterlamellen signifikant, beispielsweise auf mindestens eine Größenordnung (mindestens einer Zehnerpotenz).

**[0019]** Durch die unterschiedlichen Röntgenschwächungskoeffizienten von Füllmaterial und Gittermaterial der Gitterlamellen kann ein starker Kontrast zwischen den beiden Bereichen erzielt werden, wie er für die Funktion des Phasenkontrastgitters erforderlich ist.

**[0020]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform weisen das Füllmaterial und das Material der Gitterla-

mellen unterschiedliche Röntgen-Phasenschubkoeffizienten auf.

**[0021]** Durch die Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen Röntgen-Phasenschubkoeffizienten für das Füllmaterial und das Material der Gitterlamellen lassen sich somit auch angepasste G1-Gitter realisieren.

**[0022]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform weisen die Gitterlamellen eine quaderförmige Außen-geometrie auf.

**[0023]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform sind die Gitterlamellen azimuthal äquidistant angeordnet.

**[0024]** Durch das in azimuthaler Richtung äquidistante Anordnen der Gitterlamellen entsteht ein regelmäßiges Phasenkontrastgitter, bei dem alle Gitterlamellen parallel zu der Strahlausbreitungsrichtung der verwendeten Röntgenstrahlung verlaufen.

**[0025]** Gemäß einer Ausführungsform weisen die Gitterlamellen azimuthaler Richtung eine Dicke zwischen 1 µm und 100 µm auf. Vorzugsweise weisen die Gitterlamellen eine Dicke von einem bzw. wenigen Mikrometern bis zu 10 bzw. einigen 10 Mikrometern auf. Derartige Gitterstege sind für Gitterinterferometer im Bereich der Röntgenstrahlung besonders geeignet.

**[0026]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform weisen die Gitterlamellen in azimuthaler Richtung einen Abstand (Gitterspalt) zwischen 1 und 100 Mikrometern auf. In einer speziellen Ausführungsform beträgt der Abstand zwischen den Gitterlamellen in azimuthaler Richtung einige Mikrometer bis hin zu einigen 10 Mikrometern. Insbesondere kann der Abstand zwischen benachbarten Gitterlamellen in azimuthaler Richtung der Dicke der Gitterlamellen in azimuthaler Richtung entsprechen. Auf diese Weise entsteht zwischen Gittersteg und Gitterspalt ein Verhältnis von 1: 1. Dies ist für Gitterinterferometer besonders günstig.

**[0027]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform weisen die Gitterlamellen in radialer Richtung eine Höhe von mindestens 5 Mikrometern auf. Insbesondere für G0 bzw. G2 Gitter kann die Höhe der Gitterlamellen in radialer Richtung größer als 100 Mikrometer oder sogar mehr als 200 Mikrometer betragen. In einer speziellen Ausführungsform kann die Höhe der Gitterlamellen mindestens 1000 Mikrometer betragen.

**[0028]** In einer weiteren Ausführungsform sind die Gitterlamellen auf einem Trägermaterial angeordnet.

**[0029]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst das Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters ferner einen Schritt zum Ausfüllen von

Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen mit einem Füllmaterial.

**[0030]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst das Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters ferner die Schritte des Bereitstellens eines Basismaterials und des Einarbeitens von Aussparungen in das bereitgestellte Basismaterial. Ferner kann das Verfahren einen Schritt zum Verfüllen der eingearbeiteten Aussparungen mit einem Gitterwerkstoff umfassen.

**[0031]** Auf diese Weise entsteht durch den in den in die Aussparungen des Basismaterials eingebrachten Gitterwerkstoff eine Mehrzahl von Gitterlamellen.

**[0032]** In einer Ausführungsform kann anschließend in einem weiteren Schritt das verbliebene Basismaterial um die Gitterlamelle vollständig oder zumindest teilweise entfernt werden.

**[0033]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst das Verfahren einen Schritt zum Aufbringen einer Trägerschicht auf das Basismaterial. Dabei wird die Trägerschicht auf der Seite des Basismaterials aufgebracht, auf der sich die Aussparungen befinden. Das Aufbringen der Trägerschicht erfolgt, nachdem der Gitterwerkstoff in die Aussparungen eingebracht worden ist.

**[0034]** Gemäß einer Ausführungsform umfasst das Basismaterial einen Silizium-Wafer.

**[0035]** Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst der Schritt zum Einarbeiten der Aussparungen in das Basismaterial einen Schritt zum naschemischen Ätzen des Basismaterials. Insbesondere kommt hierfür ein elektrochemisches Ätzverfahren, wie zum Beispiel Photo Assisted Electrochemical Etch (PAECE) in Frage. Dieses Ätzverfahren ist für die Ausbildung von schmalen Aussparungen mit großer Tiefe gut geeignet.

**[0036]** Gemäß einem weiteren Aspekt schafft die vorliegende Erfindung ein Gitterinterferometer mit einem erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitter.

**[0037]** Darüber hinaus betrifft die vorliegende Erfindung ein Röntgengerät mit einem solchen Gitterinterferometer.

**[0038]** Im Weiteren werden mögliche Ausführungsformen der unterschiedlichen Aspekte der Erfindung unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen näher beschrieben.

**[0039]** Dabei zeigen:

**[0040]** Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Gitterinterferometers gemäß einer Ausführungsform;

**[0041]** Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch ein Phasenkontrastgitter gemäß einer Ausführungsform;

**[0042]** Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Seitenansicht auf ein Phasenkontrastgitter gemäß einer Ausführungsform;

**[0043]** Fig. 4 eine schematische Darstellung einer Seitenansicht auf ein Phasenkontrastgitter gemäß einer weiteren Ausführungsform;

**[0044]** Fig. 5 schematische Darstellungen einzelner Produktionsschritte wie sie einem Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters gemäß einer Ausführungsform zugrunde liegen;

**[0045]** Fig. 6 schematische Darstellungen eines Ablaufdiagramms, wie es einem Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters gemäß einer Ausführungsform zugrunde liegt; und

**[0046]** Fig. 7 eine schematische Darstellung eines konventionellen Gitterinterferometers.

#### Beschreibung von Ausführungsformen

**[0047]** Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Gitterinterferometers **1**. Das Gitterinterferometer **1** umfasst eine Strahlungsquelle **3**. Diese Strahlungsquelle **3** ist nahezu punktförmig und emittiert Röntgenstrahlung in Richtung eines Detektors **5**. Zwischen der Strahlungsquelle **3** und dem Detektor **5** ist eine zu untersuchende Probe **4** angeordnet. Weiterhin ist zwischen der Strahlungsquelle **3** und der Probe **4** ein erstes Phasenkontrastgitter **2-1** (G0-Gitter) angeordnet. Zwischen Probe **4** und Detektor **5** können ferner ein oder zwei weitere Phasenkontrastgitter **2-2** (G1-Gitter) und **2-3** (G2-Gitter) angeordnet sein. Die Phasenkontrastgitter **2-i** sind dabei mindestens in einer Raumrichtung gebogen. Das heißt, die Phasenkontrastgitter **2-i** weisen in einer Schnittebene durch die Strahlungsquelle **3** und den Detektor **5** eine Geometrie eines Kreissegments auf. Die Mittelpunkte der Kreise dieser Kreissegmente liegen dabei in etwa an der Position der Strahlungsquelle **3**. Die Gitterlamellen der Phasenkontrastgitter **2-i** verlaufen daher in dieser Schnittebene parallel zur Strahlausbreitungsrichtung der Strahlung aus der Strahlungsquelle **3**.

**[0048]** Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch ein Phasenkontrastgitter **2** gemäß einer Ausführungsform. Das Phasenkontrastgitter **2** umfasst dabei eine Mehrzahl von Gitterlamellen **12**. Die Gitterlamellen sind dabei alle auf einen gemeinsamen Mittelpunkt **M** ausgerichtet. Mit anderen Worten, die Gitterlamellen **12** sind auf einer (imaginären) Fläche eines Segments einer Kugeloberfläche oder eines Zylindermantels angeordnet und bilden somit die Form eines zylinderförmigen oder kugelförmigen

Segments. Der Punkt M stellt dabei den Mittelpunkt der Kugel bzw. die Mittelachse des Zylinders dar. Die Gitterlamellen **12** verlaufen somit alle parallel zu von dem Mittelpunkt M ausgehenden Linien bzw. Strahlen.

**[0049]** Die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen **12** können dabei mit einem Füllmaterial **14** ausgefüllt sein. Auf diese Weise kann das Phasenkontrastgitter **2** stabilisiert werden. Insbesondere können auf diese Weise die Ausrichtungen der Gitterlamellen **12** und auch die kreisförmige bzw. kugelförmige Biegung der Gitterlamellen **12** fixiert werden. Die Materialien für die Gitterlamellen **12** und das Füllmaterial **14** in den Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen **12** werden im Nachfolgenden noch näher beschrieben.

**[0050]** Bei den Gitterlamellen **12** kann es sich beispielsweise um Gitterlamellen mit einer quaderförmigen Außengeometrie handeln, die hier im Querschnitt durch Rechtecke dargestellt sind. Die einzelnen Gitterlamellen **12** können dabei – insbesondere für das G0-Gitter **2-1** und das G2-Gitter **2-3** – in radialer Richtung, das heißt in Ausbreitungsrichtung der Strahlung, eine Höhe  $h$  von mindestens 100 Mikrometern aufweisen. Die Höhe  $h$  der Gitterlamellen kann je nach Anwendungsfall auch einige 100 Mikrometer oder 1000 Mikrometern und mehr betragen. Für das G1-Gitter **2-2** ist dagegen auch eine Höhe  $h$  von mehr als 5  $\mu\text{m}$  möglich.

**[0051]** Die Dicke  $d$  der einzelnen Gitterlamellen **12** in azimuthaler Richtung entspricht der Stegbreite des Phasenkontrastgitters **2** und kann zum Beispiel im Bereich zwischen 1 Mikrometer und 100 Mikrometer variieren. Insbesondere sind Gitterlamellen mit einer Dicke  $d$  im Bereich von einigen Mikrometern bis einigen 10 Mikrometern möglich.

**[0052]** Der Abstand  $a$  in azimuthaler Richtung zwischen benachbarten Gitterlamellen **12** entspricht einem Gitterspalt des Phasenkontrastgitters **2** und kann im Bereich zwischen 1 und 100 Mikrometer variieren. Auch hier sind beispielsweise Abstände  $a$  zwischen einigen Mikrometern und einigen 10 Mikrometern möglich. In einer speziellen Ausführungsform kann die Dicke  $d$  einer Gitterlamelle **12** genau oder zumindest annähernd dem Abstand  $a$  von benachbarten Gitterlamellen **12** entsprechen, so dass zwischen Gittersteg und Gitterspalt ein Verhältnis von 1:1 entsteht. Vorzugsweise sind die Gitterlamellen **12** des Phasenkontrastgitters **2** in azimuthaler Richtung äquidistant angeordnet. Die genaue Dimensionierung der Gitterlamellen **12**, sowie der Abstände zwischen den einzelnen Gitterlamellen **12** ist dabei jeweils auf die entsprechende Anwendung, insbesondere auf die verwendete Röntgenstrahlung und die dabei eingesetzte Energie abgestimmt. Die Spaltbreite, also der azimuthale Abstand  $a$  zwischen zwei be-

nachbarten Gitterlamellen **12** kann dabei genau oder annähernd der Stegbreite, also der azimuthalen Dicke  $d$  einer Gitterlamelle entsprechen.

**[0053]** Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer seitlichen Ansicht auf ein Phasenkontrastgitter **2** für ein Gitterinterferometer gemäß einer Ausführungsform. Die einzelnen Gitterlamellen **12** sind dabei in Form eines Segments einer zylinderförmigen Fläche  $Z$  angeordnet. Auf diese Weise kann bereits eine sehr gute Anpassung des Phasenkontrastgitters **2** an die Strahlausbreitungsrichtung einer punktförmigen Strahlungsquelle erreicht werden.

**[0054]** Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer Seitenansicht auf ein Phasenkontrastgitter **2** gemäß einer weiteren Ausführungsform. Dabei sind die Gitterlamellen **12** in Form eines Segments einer kugelförmigen Fläche  $K$  angeordnet. Auf diese Weise kann die Ausrichtung der Gitterlamellen **12** noch besser an die Strahlausbreitungsrichtung einer punktförmigen Strahlungsquelle angepasst werden.

**[0055]** Im Nachfolgenden wird unter Bezug auf Fig. 5 die Herstellung eines Phasenkontrastgitters **2** näher erläutert, wie es einem Ausführungsbeispiel zugrunde liegt.

**[0056]** Zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Phasenkontrastgitters **2** wird zunächst ein Basismaterial **10** bereitgestellt, wie dies zum Beispiel in Teilbild I in Fig. 5 dargestellt ist. Bei diesem Basismaterial **10** kann es sich beispielsweise um ein flächiges Basismaterial handeln, das für die nachfolgenden Bearbeitungsschritte geeignet ist. Insbesondere sollte das Basismaterial **10** hierzu eine ausreichende Temperaturbeständigkeit aufweisen und auch für die nachfolgenden Bearbeitungsprozesse geeignet sein. Zum Beispiel kann es sich bei dem Basismaterial **10** um Silizium handeln. Beispielsweise ist ein Silizium-Wafer möglich, insbesondere ein Silizium-Wafer aus  $n$ -dotiertem Silizium. Derartige Silizium-Wafer sind zum Beispiel aus dem Bereich der Mikrochipherstellung bekannt.

**[0057]** Wie in Teilbild II in Fig. 5 dargestellt ist, werden in das Basismaterial **10** zunächst Aussparungen eingearbeitet. Diese Aussparungen **11** können insbesondere eine quaderförmige Geometrie aufweisen. Unter quaderförmig ist in diesem Zusammenhang kein streng geometrischer Quader mit exakt geradlinigen Kantenverläufen und scharfen rechtwinkligen Ecken zu verstehen. Vielmehr handelt es sich bei den quaderförmigen Aussparungen um Strukturen, die eine zumindest annähernd quaderförmige Geometrie aufweisen, soweit diese durch die entsprechenden technischen Prozesse möglich ist. Auch abgerundete Kanten und Ecken sind dabei möglich.

**[0058]** Für Phasenkontrastgitter **2** mit Gitterlamellen **12** in Form eines Segments einer zylinderförmigen Fläche **Z** können die Aussparungen **11** in dem Basismaterial **10** dabei durch langgezogene Schlitzre realisiert werden. Sollen die Gitterlamellen **12** dagegen in Form eines Segments einer kugelförmigen Fläche **K** angeordnet werden, wie dies beispielsweise zuvor im Zusammenhang mit **Fig. 4** beschrieben wurde, so sind anstelle einzelner langgezogener Schlitzre jeweils mehrere aneinander gereihte kürzere quaderförmige Aussparungen **11** erforderlich.

**[0059]** Die Breite der Aussparungen **11** entspricht dabei der Dicke  $d$  der Gitterlamellen **12** des Phasenkontrastgitters **2** (Stegbreite). Die Dicke der einzelnen Stege zwischen zwei benachbarten Aussparungen **11** entspricht dabei dem Abstand  $a$  zwischen benachbarten Gitterlamellen **12** (Spaltbreite).

**[0060]** Das Einarbeiten der Aussparungen **11** in das Basismaterial **10** kann beispielsweise durch einen Ätzprozess, wie zum Beispiel einen nasschemischen Ätzprozess erfolgen. Insbesondere kommen hierfür das elektrochemische Ätzverfahren, wie zum Beispiel Photo Assisted Electrochemical Etch (PAECE) in Frage. Darüber hinaus sind weitere Verfahren möglich, die in ein Basismaterial **10**, wie beispielsweise einen Silizium-Wafer, entsprechend dünne Aussparungen **11** mit der erforderlichen Tiefe (entsprechend der Höhe  $h$  der Gitterlamellen **12**) erzeugen können.

**[0061]** Nachdem die Aussparungen **11** in das Basismaterial **10** eingearbeitet worden sind, kann eine Passivierung der Oberfläche des Basismaterials erfolgen (Teilbild III in **Fig. 5**). Insbesondere kann dabei die Oberfläche des Basismaterials **10** in den Aussparungen **11** passiviert werden. Hierzu wird die Oberfläche des Basismaterials **10** derart behandelt, dass die Oberfläche weitestgehend resistent gegen Ätzprozesse oder ähnliches wird. Beispielsweise kann diese Passivierung mittels Sauerstoff oder Stickstoff erfolgen.

**[0062]** In einem weiteren Schritt können die Aussparungen **11** des Basismaterials **10** mit dem Material für die Gitterlamellen **12** ausgefüllt werden, wie in Teilbild IV in **Fig. 5** dargestellt. Hierzu kann beispielsweise das gewünschte Material für die Gitterlamellen **12** zunächst geschmolzen werden und anschließend in flüssigem Zustand in die Aussparungen **11** des Basismaterials **10** eingefüllt werden. Für das flüssige Verfüllen des Materials der Gitterlamellen **12** in die Aussparungen **11** des Basismaterials **10** muss das Material der Gitterlamellen **12** daher einen Schmelzpunkt aufweisen, der niedriger ist als der Schmelzpunkt des Basismaterials **10**. Beispielsweise sind hierzu Materialien mit einem Schmelzpunkt von maximal 900 °C besonders geeignet. Darüber hinaus sollte das Material für die Gitterlamellen **12** auch einen geeigneten Röntgenschwächungskoeffizienten aufweisen.

Hierzu sind insbesondere für das Phasenkontrastgitter **2-1** zwischen Strahlungsquelle **3** und Probe **4**, sowie das Phasenkontrastgitter **2-3** unmittelbar vor dem Detektor **5** Materialien mit einem großen Röntgenschwächungskoeffizienten bzw. einer hohen Ordnungszahl geeignet. Beispielsweise eignen sich hierzu Materialien wie Blei, Bismut, Indium, Zink, Zinn, Kupfer, Silber, Gold, sowie Legierungen mit einem oder mehreren dieser Materialien.

**[0063]** Für das Phasenkontrastgitter **2-2** (G1-Gitter) zwischen Probe **4** und dem Phasenkontrastgitter **2-3** unmittelbar vor dem Detektor **5** dagegen sind Materialien mit einem niedrigen Röntgenschwächungskoeffizienten, bzw. niedriger Ordnungszahl geeignet. Darüber hinaus sollte für das Phasenkontrastgitter **2-2** das Material der Gitterlamellen **12** und das Material in den Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen **12** einen unterschiedlichen, vorzugsweise signifikant unterschiedlichen Röntgen-Phasenschwächungskoeffizienten aufweisen.

**[0064]** Nachdem die Aussparungen **11** in dem Basismaterial **10** mit dem gewünschten Material für die Gitterlamellen **12** verfüllt worden sind und das Material für die Gitterlamellen **12** ausgehärtet ist, kann in einem weiteren Schritt optional eine Trägerschicht **13** auf das Basismaterial **10** aufgebracht werden (Teilbild V in **Fig. 5**). Diese Trägerschicht **13** wird dabei auf die Seite des Basismaterials **10** aufgebracht, auf der sich die zwischenseitlich verfüllten Aussparungen **11** befinden. Beispielsweise kann es sich bei dieser Trägerschicht **13** um ein geeignetes Polymer, wie zum Beispiel Silikon oder einen weiteren Kunststoff, handeln. Vorzugsweise handelt es sich bei der Trägerschicht **13** um ein Material, das sich gut mit dem Material der Gitterlamelle **12** verbindet und dabei eine hohe Flexibilität aufweist.

**[0065]** Anschließend kann, wie in Teilbild VI in **Fig. 5** dargestellt, das verbleibende Basismaterial **10** ganz oder zumindest teilweise entfernt werden. Hierzu eignen sich beispielsweise geeignete Ätzprozesse. Insbesondere kann dies durch einen anisotropen Ätzprozess erfolgen. Beispielsweise kann dies durch Ätzen mit Kaliumhydroxyd (KOH) erfolgen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Passivierung des Basismaterials **10** bleiben dabei die Gitterlamellen **12** weitestgehend geschützt. Ist dabei eine Trägerschicht **13** auf das Basismaterial **10** und die Gitterlamellen **12** aufgebracht worden, so kann das Basismaterial **10** vollständig entfernt werden. In diesem Fall werden die einzelnen Gitterlamellen **12** durch die Trägerschicht **13** gehalten. Alternativ kann auch ein geringer Rest des Basismaterials **10** verbleiben, so dass die Gitterlamellen **12** auch durch das verbleibende Basismaterial **10** gehalten werden können. In diesem Fall ist die optionale Trägerschicht **13** nicht zwingend erforderlich.

**[0066]** Nachdem beispielsweise durch die zuvor ausgeführten Schritte ein zunächst planares Phasenkontrastgitter bereitgestellt worden ist, kann nun, wie in Teilbild VII in **Fig. 5** dargestellt, diese planare Gitterstruktur in einer oder zweier Raumrichtungen gebogen werden. Hierzu kann die planare Gitterstruktur beispielsweise auf eine zylinderförmige oder kugelförmige Form **20** aufgebracht werden. Auf diese Weise wird die planare Gitterstruktur wie gewünscht gekrümmt. Die Form **20** weist dabei auf ihrer gekrümmten Seite einen Radius auf, der dem Radius der gewünschten Fläche des zylinderförmigen bzw. kugelförmigen Segments für das spätere Phasenkontrastgitter entspricht.

**[0067]** Alternativ kann das planare Phasenkontrastgitter auch auf andere Weise gekrümmt werden. So kann das planare Phasenkontrastgitter zum Beispiel an gegenüberliegenden Außenseiten eingespannt werden und durch Ausüben einer Kraft auf die eingespannten Seiten des Phasenkontrastgitters eine Krümmung hervorgerufen werden. Andere Verfahren zur Krümmung des ursprünglich planaren Phasenkontrastgitters sind darüber hinaus ebenso möglich.

**[0068]** Anschließend können, wie in Teilbild VIII in **Fig. 5** dargestellt, die Zwischenräume zwischen den einzelnen Gitterlamellen **12** mit einem geeigneten Füllmaterial **14** ausgefüllt werden. Für das erste und das dritte Phasenkontrastgitter **2-1** und **2-3** (G0-Gitter und G2-Gitter) weist das Füllmaterial **14**, mit dem die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen **12** verfüllt werden, in der Regel eine zu dem Röntgenschwächungskoeffizienten bzw. der Ordnungszahl der Gitterlamellen **12** stark abweichenden Röntgenschwächungskoeffizienten bzw. Ordnungszahl auf. So sollte der Zwischenraum zwischen den einzelnen Gitterlamellen **12** insbesondere für das erste Phasenkontrastgitter **2-1** zwischen Strahlungsquelle **3** und Probe **4**, sowie für das dritte Phasenkontrastgitter **2-3** unmittelbar vor dem Detektor **5** ein Füllmaterial mit geringer Ordnungszahl bzw. kleinem Röntgenschwächungskoeffizienten aufweisen. Alternativ sind für die Gitter **2-2** (G1-Gitter) sowohl für die Gitterlamellen **12**, als auch für das Füllmaterial in den Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen **12**, vorzugsweise Materialien geeignet, die die jeweilige Röntgenstrahlung möglichst wenig absorbieren. Der Röntgen-Phasenschubkoeffizient des Materials der Gitterlamellen **12** und des Füllmaterials in den Zwischenräumen der Gitterlamellen **12** sollen dabei insbesondere für G1-Gitter vorzugsweise unterschiedlich sein.

**[0069]** Beispielsweise sind als Füllmaterialien aushärtbare Polymere, insbesondere Polymere auf Epoxidbasis geeignet. Nach dem Aushärten des Füllmaterials **14**, das in die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen **12** eingebracht worden ist, entsteht ein stabiles Phasenkontrastgitter **2**. Das so gekrümmte Phasenkontrastgitter **2** kann anschließend, beispiels-

weise, nachdem das Füllmaterial in den Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen **12** ausgehärtet ist, von der Form **20** abgenommen und in einem zuvor beschriebenen Gitterinterferometer eingesetzt werden.

**[0070]** Soll das Phasenkontrastgitter **2** Gitterlamellen **12** mit einem niedrigen Röntgenschwächungskoeffizienten aufweisen, die mit einem Füllmaterial **14** mit hohem Röntgenschwächungskoeffizienten in den Zwischenräumen der Gitterlamellen verfüllt sind, so kann auch als Basismaterial **10** ein Basismaterial mit niedrigem Röntgenschwächungskoeffizienten verwendet werden, das wie zuvor beschrieben strukturiert werden kann, ohne dass dabei die Aussparungen **11** mit Gittermaterial verfüllt werden. Anschließend kann dann das so bereitgestellte planare Phasenkontrastgitter direkt gebogen oder zum Biegen beispielsweise auf eine zylinderförmige oder kugelförmige Form aufgebracht werden und mit einem geeigneten Füllmaterial **10** mit hohem Röntgenschwächungskoeffizienten verfüllt werden. In diesem Fall entfällt somit der Schritt des Einbringens von Gittermaterial in die Aussparungen des strukturierten Basismaterials **10** sowie das anschließende vollständige oder teilweise Entfernen des verbliebenen Basismaterials.

**[0071]** Steht ein geeignetes Basismaterial **10** mit hohem Röntgenschwächungskoeffizienten zur Verfügung, so kann der zuvor beschriebene vereinfachte Prozess auch zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters **2** auch für Gitterlamellen mit hohem Röntgenschwächungskoeffizienten und Zwischenräumen mit niedrigem Röntgenschwächungskoeffizienten realisiert werden.

**[0072]** Analog kann auch für das mittlere Phasenkontrastgitter **2-2** (G1-Gitter) auf gleiche Weise ein Phasenkontrastgitter **2-2** mit unterschiedlichen Röntgen-Phasenschubkoeffizienten hergestellt werden.

**[0073]** **Fig. 6** zeigt eine schematische Darstellung eines Ablaufdiagramms zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters **2**, wie es einem Ausführungsbeispiel zugrunde liegt.

**[0074]** Das Verfahren umfasst dabei mindestens einen Schritt zum Bereitstellen eines planaren Phasenkontrastgitters mit einer Mehrzahl von Gitterlamellen, sowie einen Schritt S6 zum Biegen des bereitgestellten planaren Phasenkontrastgitters mit den Gitterlamellen **12** in Form eines Segments einer zylinderförmigen oder kugelförmigen Fläche, sowie einem Schritt S7 zum Ausfüllen der Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen **12** mit einem Füllmaterial **14**.

**[0075]** Zum Bereitstellen der Gitterlamellen **12** für das erfindungsgemäße Phasenkontrastgitter **2** kann

in Schritt S1 ein Basismaterial **10** bereitgestellt werden. Beispielsweise kann es sich bei diesem Basismaterial **10** um Silizium, wie zum Beispiel n-dotiertes Silizium, insbesondere um einen Silizium-Wafer handeln. In dieses Basismaterial **10** werden in Schritt S2 Aussparungen eingebracht. Beispielsweise kann es sich bei den Aussparungen **11** um quaderförmige Aussparungen handeln. Anschließend wird in Schritt S3 in diese Aussparungen ein Gitterwerkstoff eingebracht. Durch das Einbringen dieses Gitterwerkstoffs in die Aussparungen entsteht somit eine Mehrzahl von Gitterlamellen **12**.

**[0076]** Optional kann in einem Schritt S4 daraufhin eine Trägerschicht **13** auf das Basismaterial **10** aufgebracht werden, wobei die Trägerschicht **13** auf der Seite des Basismaterials **10** aufgebracht wird, auf der die Aussparungen in das Basismaterial **10** eingearbeitet worden sind,.

**[0077]** Schließlich kann in Schritt S5 das verbliebene Basismaterial **10** um die Gitterlamellen **12** ganz oder zumindest teilweise entfernt werden. Das Entfernen des Basismaterials kann zum Beispiel mittels eines geeigneten Ätzprozesses erfolgen. Insbesondere kann dies durch einen anisotropen Ätzprozess erfolgen. Beispielsweise kann dies durch Ätzen mit Kaliumhydroxyd (KOH) durchgeführt werden.

**[0078]** Zusammenfassend schafft die vorliegende Erfindung ein Phasenkontrastgitter für ein Gitterinterferometer sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Phasenkontrastgitters. Das Phasenkontrastgitter weist dabei eine Form auf, die senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Strahlung in den Gitterinterferometer zumindest in eine Richtung gekrümmt ist. Zur Stabilisierung des Phasenkontrastgitters werden die Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen mit einem Füllmaterial verfüllt. Die Herstellung eines solchen Phasenkontrastgitters kann durch Ätzen der negativen Struktur in ein Basismaterial, wie zum Beispiel einen Silizium-Wafer, erfolgen. Die so entstandene negative Struktur kann mit geeignetem Material verfüllt werden, um Gitterlamellen des Phasenkontrastgitters zu bilden. Die dabei gewonnene Gitterlamellenstruktur kann gekrümmt werden und anschließend durch Verfüllen mit dem Füllmaterial stabilisiert werden. Auf diese Weise kann die Ausrichtung der Gitterlamellen eines Phasenkontrastgitters an die Strahlausbreitungsrichtung in dem Gitterinterferometer angepasst werden.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102010017425 A1 [0003]

**Patentansprüche**

1. Phasenkontrastgitter (2) für ein Gitterinterferometer (1), mit:

einer Mehrzahl von Gitterlamellen (12), die in Form eines zylinderförmigen oder kugelförmigen Segments angeordnet sind.

2. Phasenkontrastgitter (2) nach Anspruch 1, wobei Zwischenräume zwischen den Gitterlamellen mit einem Füllmaterial (14) gefüllt sind.

3. Phasenkontrastgitter (2) nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Gitterlamellen (12) ein Gittermaterial mit Gold, Silber, Blein, Indium, Bismut, Zinn, Zink und/oder Kupfer und/oder eine Verbindung mit einem oder mehreren dieser Elemente umfassen.

4. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Material der Gitterlamellen (12) einen Schmelzpunkt von maximal 900 °C aufweist.

5. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das Füllmaterial (14) einen Röntgenschwächungskoeffizienten aufweist, der von dem Röntgenschwächungskoeffizienten des Gittermaterials der Gitterlamellen (12) verschieden ist.

6. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das Füllmaterial (14) und das Material der Gitterlamellen (12) unterschiedliche Röntgen-Phasenschubkoeffizienten aufweisen.

7. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Gitterlamellen (12) eine quaderförmige Außengeometrie aufweisen.

8. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Gitterlamellen (12) in azimutaler Richtung eine Dicke (d) zwischen einem Mikrometer und 100 Mikrometer aufweisen.

9. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Gitterlamellen (12) in azimutaler Richtung einem Abstand (a) von zwischen 1 und 100 Mikrometer aufweisen.

10. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Gitterlamellen (12) in radialer Richtung eine Höhe (h) von mindestens 5 Mikrometer aufweisen.

11. Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Gitterlamellen (12) auf einem Trägermaterial (13) angeordnet sind.

12. Gitterinterferometer (1) mit einem Phasenkontrastgitter (2) nach einem der Ansprüche 1 bis 11.

13. Verfahren zur Herstellung eines Phasenkontrastgitters (2) für ein Gitterinterferometer (1), mit den Schritten:

Bereitstellen eines planaren Phasenkontrastgitters mit einer Mehrzahl von Gitterlamellen (12); und Biegen des bereitgestellten planaren Phasenkontrastgitters in Form eines zylinderförmigen oder kugelförmigen Segments.

14. Verfahren nach Anspruch 13, mit einem Schritt zum Ausfüllen (S7) von Zwischenräumen zwischen den Gitterlamellen (12) mit einem Füllmaterial (14).

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, ferner umfassend die Schritte:

Bereitstellen (S1) eines Basismaterials (10); Einarbeiten (S2) von Aussparungen in das Basismaterial (10);

Verfüllen (S3) der eingearbeiteten Aussparungen mit einem Gitterwerkstoff, wobei durch den in die Aussparungen eingebrachten Gitterwerkstoff eine Mehrzahl von Gitterlamellen (12) entsteht.

16. Verfahren nach Anspruch 15, ferner umfassend einen Schritt zum zumindest teilweisen Entfernen (S5) des verbliebenen Basismaterials (10) um die Gitterlamellen (12).

17. Verfahren nach Anspruch 16, ferner umfassend einen Schritt zum Aufbringen (S4) einer Trägerschicht (13) auf das Basismaterial (10) auf der Seite der Aussparungen, nachdem der Gitterwerkstoff in die Aussparungen eingebracht worden ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

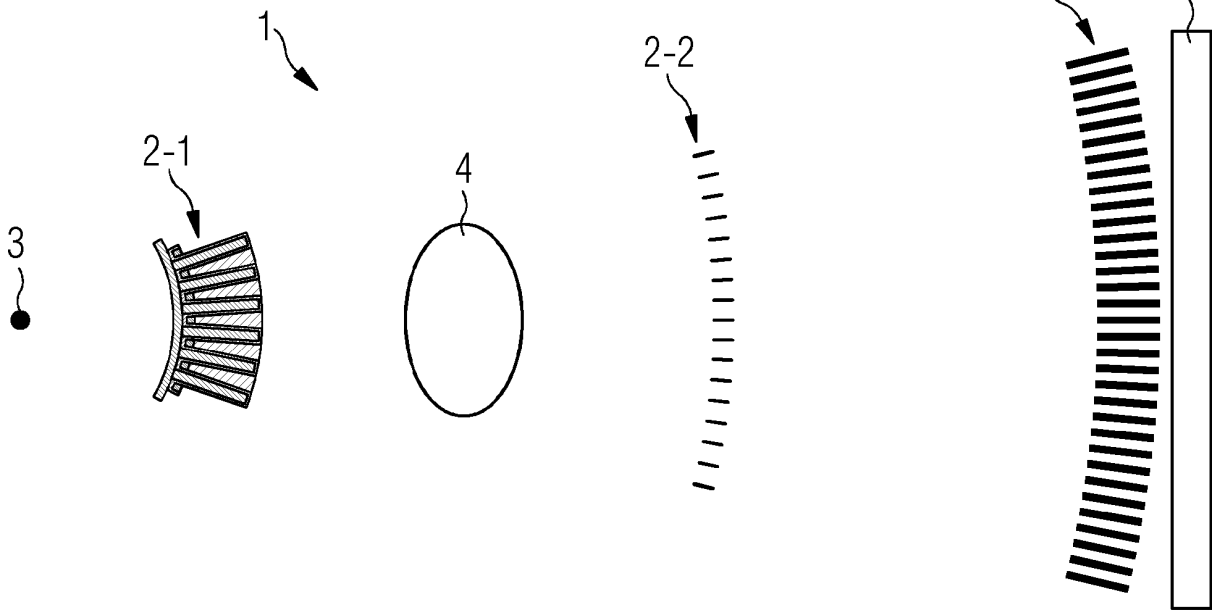


FIG 2

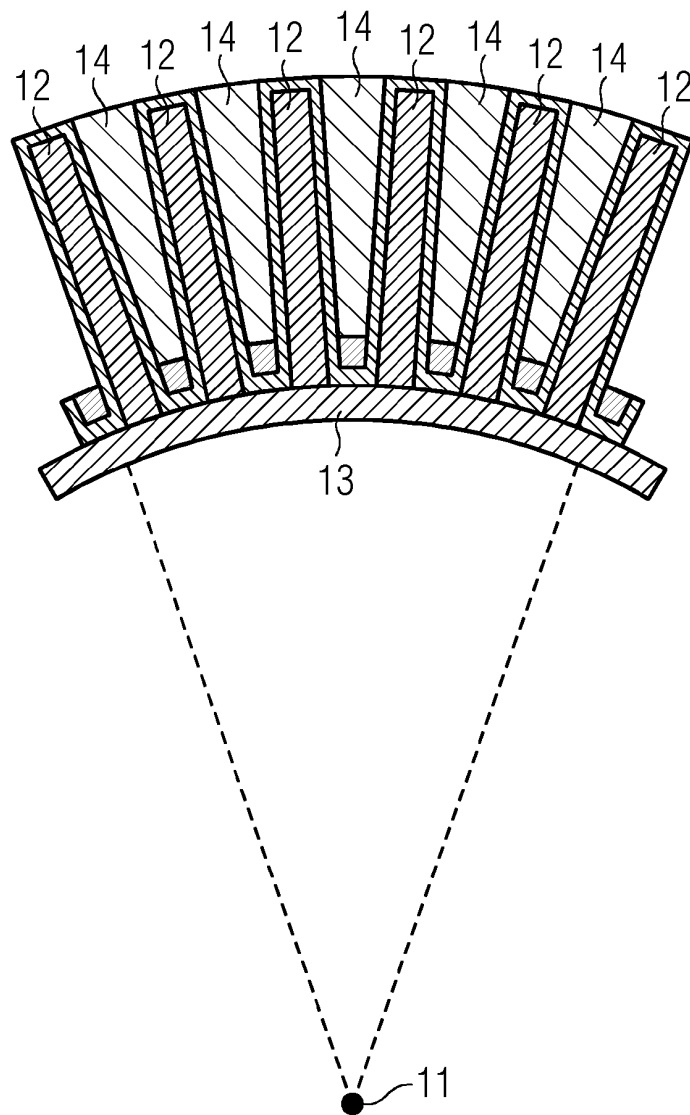


FIG 3

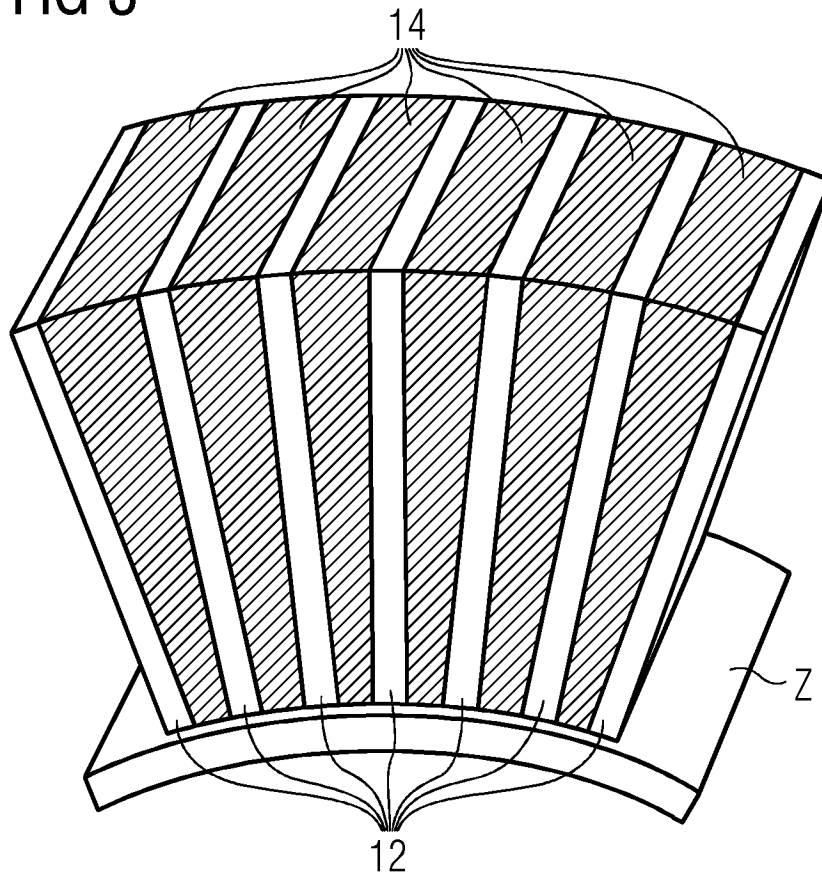


FIG 4

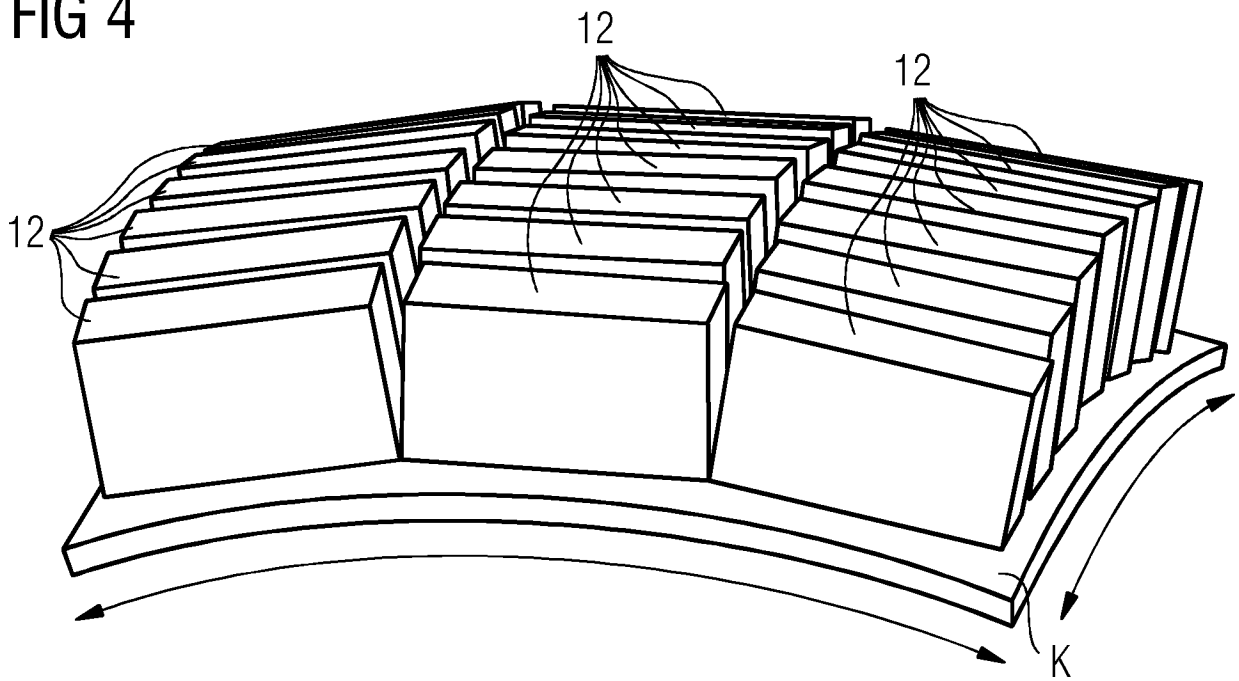


FIG 5a

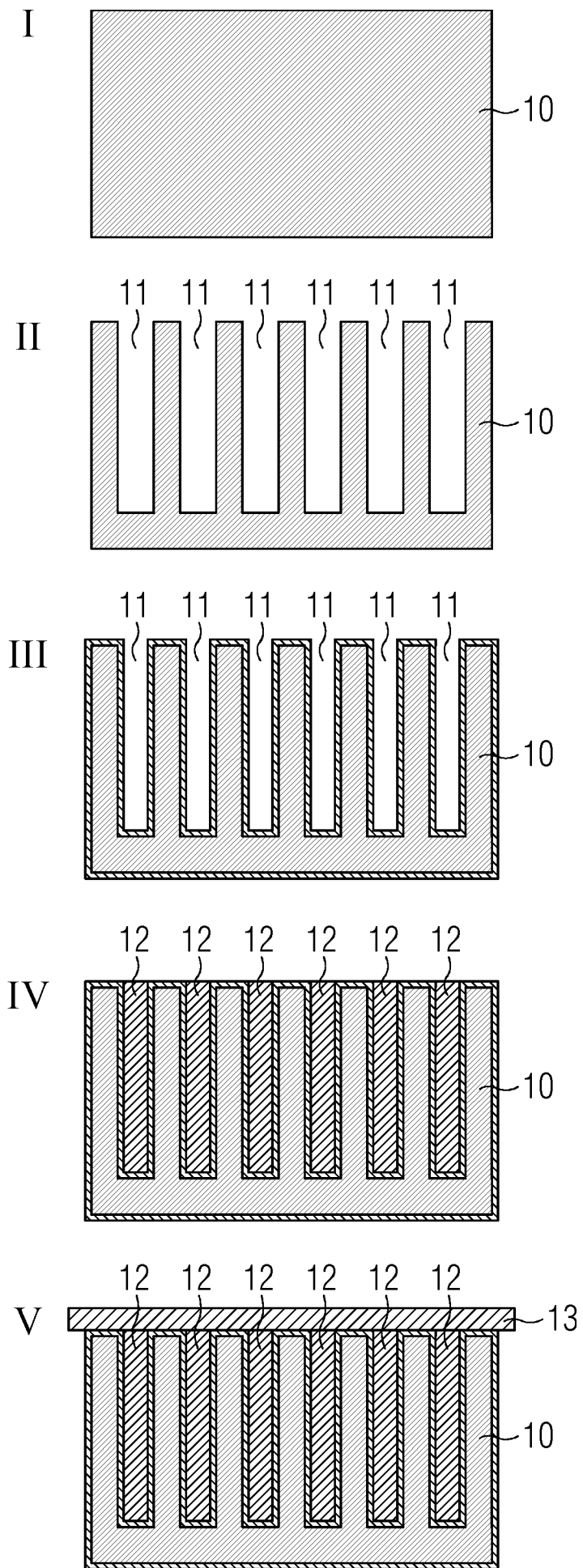


FIG 5b

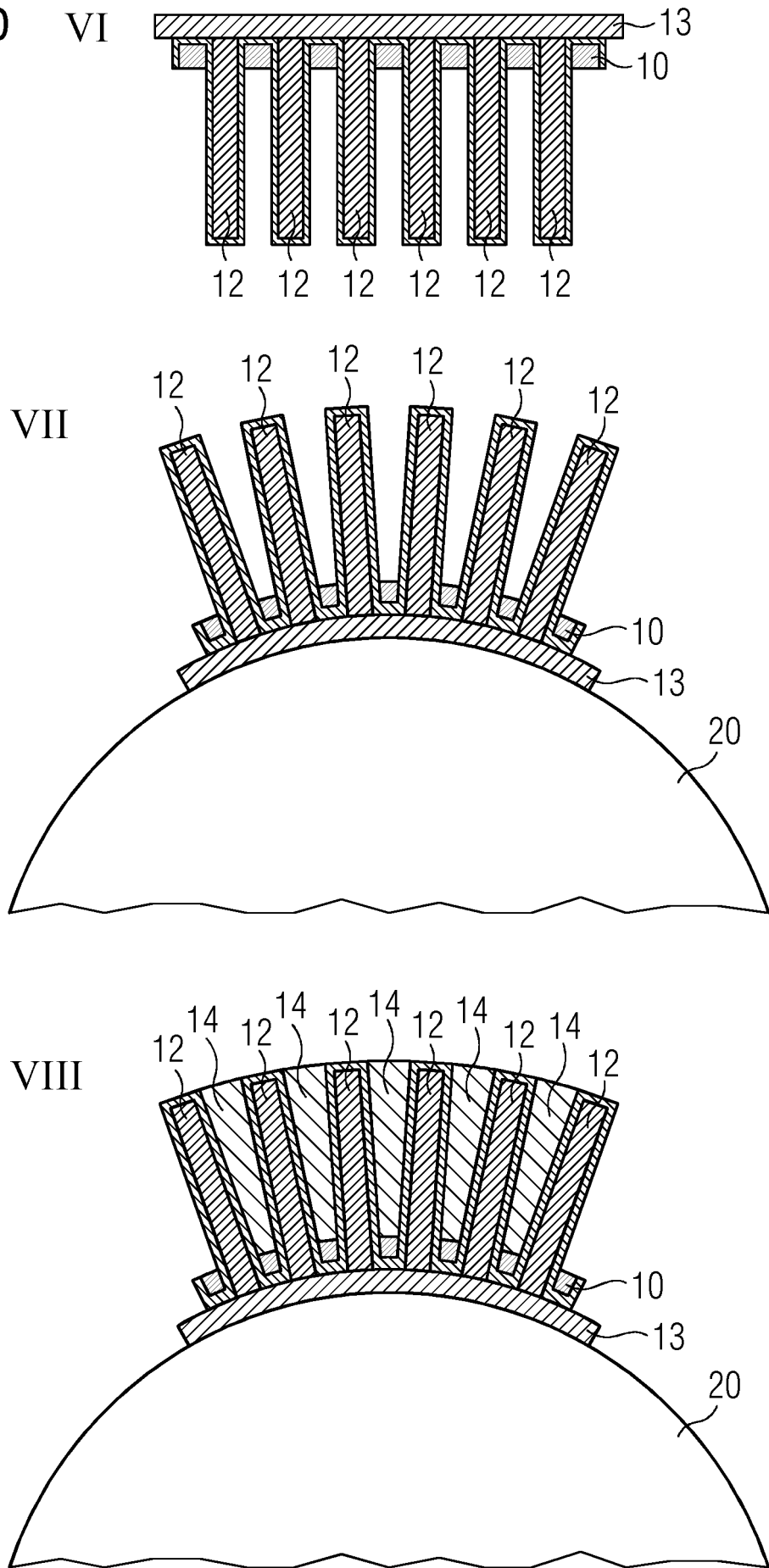


FIG 6

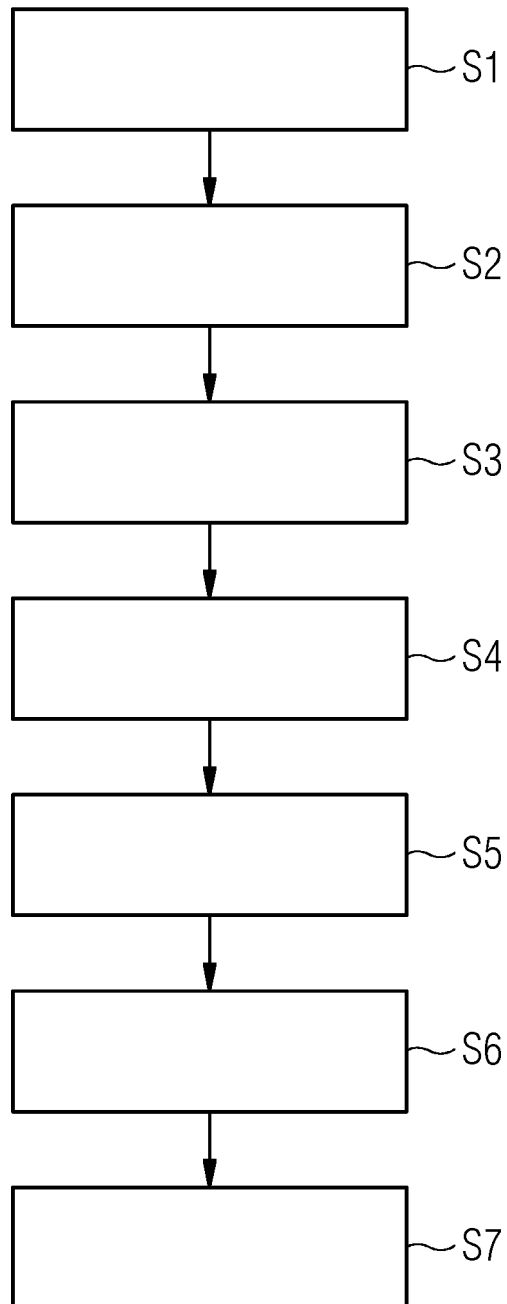


FIG 7

