



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

- (43)

Veröffentlichungstag:
18.12.2024 Patentblatt 2024/51
- (51)

Internationale Patentklassifikation (IPC):
G21K 1/02 (2006.01)
- (21)

Anmeldenummer: 24181732.9
- (52)

Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
G21K 1/025; G21K 2201/067
- (22)

Anmeldetag: 12.06.2024

- (84)

Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
GE KH MA MD TN
- (72)

Erfinder:
• BEHRMANN, Ole
25524 Itzehoe (DE)
• LISEC, Thomas
25524 Itzehoe (DE)
• BODDULURI, Mani-Teja
25524 Itzehoe (DE)
• GOJDKA, Björn
25524 Itzehoe (DE)
- (30)

Priorität: 14.06.2023 DE 102023205555
- (71)

Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung
der angewandten Forschung e.V.
80686 München (DE)
- (74)

Vertreter: Fischer, Florian et al
Schoppe, Zimmermann, Stöckeler,
Zinkler, Schenk & Partner mbB
Patentanwälte
Radtkoferstraße 2
81373 München (DE)

(54)

MIKROSTRUKTURIERTES TRANSMISSIONSGITTER FÜR RÖNTGENSTRAHLUNG UND
ENTSPRECHENDES HERSTELLUNGSVERFAHREN

- (57)

Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung umfassen ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters für Röntgenstrahlung, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: Bereitstellen eines Substrats und Erzeugen einer Gitterstruktur mittels Strukturieren einer Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten in einer ersten Haupt-
- seite des Substrats, wobei zwischen den Kavitäten jeweils einzelne Stege aus Substratmaterial bestehen bleiben, und Verfüllen der Kavitäten mit einer Vielzahl von Partikeln in Form von losem, trockenem Pulver. Dabei weist das Substrat eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung auf als die Partikel.

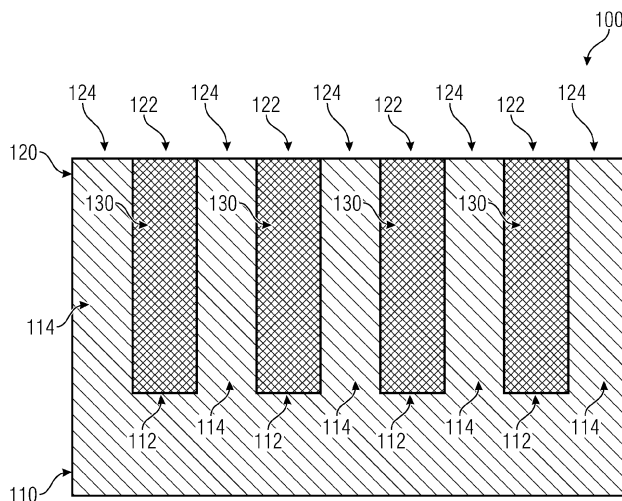


Fig. 1

Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung umfassen mikrostrukturierte Transmissionsgitter für Röntgenstrahlung, wobei die Gitterstruktur des Transmissionsgitters unter anderem eine Vielzahl von Partikeln mit einer hohen Röntgenabsorption aufweist, sowie zugehörige Herstellungsverfahren.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Ein bestehendes technisches Problem bildet die zuverlässige und wirtschaftliche Herstellung von Transmissionsgittern für Röntgenlicht. Analog zu Transmissionsgittern für sichtbares Licht bestehen Transmissionsgitter für Röntgenlicht bspw. aus einer Vielzahl von im Wechsel angeordneten strahlungsdurchlässigen und undurchlässigen Linien. Die besondere Herausforderung ist die Herstellung der für Röntgenstrahlung undurchlässigen (d.h. absorbierenden) Linien, da diese aus einem geeigneten Material bestehen müssen. Für die technische Anwendung dieser Gitter, z.B. für die klinische Dunkelfeld-Radiografie, sind große Gitterflächen von bis zu 1600 cm² notwendig, was hohe Anforderungen an entsprechende Herstellungsprozesse stellt.

Stand der Technik

[0003] Konventionelle Ansätze umfassen LIGA- (Lithographie, Galvanik und Abformung) Techniken bei denen nach der Entwicklung eines Fotolacks mittels eines galvanischen Verfahrens eine metallische Keimschicht aufgebracht wird, auf welcher anschließend ein röntgenabsorbierendes Material galvanisch abgeschieden wird. Die in LIGA herstellbare Chipfläche ist jedoch auf wenige Quadratzentimeter bei geringem Durchsatz beschränkt. Ferner ist für LIGA ein Synchrotron zur Belichtung des Fotolacks notwendig. Dies führt zu sehr hohen Prozesskosten. Um ein Verformen der Fotolackstrukturen zu verhindern, müssen diese ferner periodisch mit Stegen verbunden werden, was den Herstellungsaufwand erhöht.

[0004] Weitere Ansätze umfassen die Herstellung von Röntgentransmissionsgittern in Siliziumsubstraten mittels Ätzprozessen, gefolgt von galvanischer Abscheidung des Röntgenabsorbers. Bei solchen Ansätzen ist jedoch eine aufwendige Prozessierung im Reinraum nach dem Ätzen notwendig.

[0005] Des Weiteren stehen nur wenige Galvanikprozesse für die Abscheidung von röntgenabsorbierenden Materialien zur Verfügung, sodass in beiden vorigen diskutierten Ansätzen nur eine eingeschränkte Materialwahl zum Einsatz kommen kann. Außerdem bedingen diese Ansätze sehr hohe Prozesszeiten für die galvanische Abscheidung, sowie ein hohes Risiko für Prozessabweichungen.

[0006] Weitere konventionelle Ansätze umfassen die

Herstellung von Röntgentransmissionsgittern durch das Einbringen von Metallpartikeln in einem Lösungsmittel (Suspension) in Mikrokavitäten. Im ersten Schritt werden Gitterstrukturen mittels eines Ätzprozesses in Siliziumsubstrate strukturiert. Im zweiten Schritt werden die in der feuchten Suspension gelösten Metallpartikel auf die Gitterstrukturen aufgebracht und das Substrat wird in eine (Ultra-)Zentrifuge eingesetzt. Mittels Zentrifugation werden die feuchten Metallpartikel dann in die Gitterspalte getrieben. Im nächsten Schritt wird das Lösungsmittel verdampft und die Partikel werden durch ein der Suspension zugesetztes Bindemittel mechanisch fixiert. Abschließend wird die Oberfläche der Gitterstrukturen mechanisch von auf der Struktur aufliegenden Metallpartikeln gereinigt.

[0007] Die Figuren 8a) bis 8c) zeigen ein Beispiel für einen derartigen Prozessablauf zur Herstellung eines Röntgentransmissionsgitters mittels Einzentrifugation einer feuchten Metallpartikelsuspension. Fig. 8a) zeigt Gitterabschnitte vor (links) und nach (rechts) einem Reinigungsprozess. Fig. 8b) zeigt ein entsprechendes Gitter nach dem Reinigungsprozess und Fig. 8c) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Ansicht aus Fig. 8b).

[0008] Wie in Fig. 8c) zu erkennen ist, bilden sich bei diesem Herstellungsverfahren unerwünschte Hohlräume zwischen den Metallpartikeln aus, was durch den Einschluss von Gasblasen in der Suspension zu erklären ist. Ferner kann eine lateral inhomogene Verfüllung der Gitterstrukturen durch Variationen in der Partikelsuspension auftreten. Darüber hinaus bedingt ein solcher Ansatz hohe mechanische Belastungen der Substrate während der Zentrifugation, sowie hohe Hürden für die Prozessautomation.

[0009] Daher besteht eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, ein Konzept für ein Transmissionsgitter für Röntgenstrahlung, sowie ein zugehöriges Herstellungsverfahren, bereitzustellen, welches einen verbesserten Kompromiss hinsichtlich Effizienz, Komplexität und Zuverlässigkeit ermöglicht.

[0010] Diese Aufgabe wird durch die Gegenstände der unabhängigen Patentansprüche erfüllt. Erfindungsgemäße Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen definiert.

Zusammenfassung der Erfindung

[0011] Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung umfassen ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters für Röntgenstrahlung, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist, die prinzipiell auch in einer anderen als der hier angegebenen Reihenfolge ausführbar sind: Bereitstellen eines Substrats und Erzeugen einer Gitterstruktur mittels Strukturieren einer Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten in einer ersten Hauptseite des Substrats, wobei zwischen den Kavitäten jeweils einzelne Stege aus Substratmaterial bestehen bleiben, und Verfüllen der Kavitäten mit einer Vielzahl von Partikeln, die in Form von

losem, trockenem Pulver vorliegen. Dabei weist das Substrat eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung auf als das trockene Partikelpulver.

[0012] Ferner umfassen Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung ein mikrostrukturiertes Transmissionsgitter für Röntgenstrahlung. Dabei weist das Transmissionsgitter ein Substrat mit einer Gitterstruktur auf, wobei die Gitterstruktur mehrere abwechselnd angeordnete erste und zweite Gitterabschnitte aufweist. Ferner weisen die ersten Gitterabschnitte eine Vielzahl von Partikeln auf, die in Form von loseem, trockenem Pulver und/oder in Form von, mittels einer Beschichtung verfestigten, Partikeln vorliegen. Darüber hinaus weisen die ersten Gitterabschnitte eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung auf als die zweiten Gitterabschnitte, um so das mikrostrukturierte Transmissionsgitter für die Röntgenstrahlung zu bilden.

[0013] Optional weist das Substrat ferner eine Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten auf, in denen die Partikel der jeweiligen ersten Gitterabschnitte zumindest teilweise angeordnet sind.

[0014] Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung beruhen auf der Kernidee, das röntgenabsorbierende Material des Transmissionsgitters mittels eines losen, trockenen Pulvers herzustellen. Hierbei wurde erkannt, dass eine Vielzahl von zur Röntgenabsorption geeigneter Materialien in Pulverform bereitgestellt werden kann und entsprechende Pulver ferner mit, im Vergleich zu konventionellen Techniken, geringem Aufwand zur Herstellung von Gitterstrukturen verarbeitet werden können. Wie obig erläutert, kann das Pulver beispielsweise in Kavitäten eines Substrats eingefüllt werden, um so röntgenabsorbierende Gitterlinien des Transmissionsgitters zu bilden. Das Pulver kann somit als röntgenabsorbierendes Absorberpulver dienen und erste Gitterabschnitte des Transmissionsgitters bilden. Zwischen den Kavitäten verbleibende Substratstege können zweite Gitterabschnitte bilden, die abwechselnd mit den ersten Gitterabschnitten angeordnet sind, sodass sich ein Transmissionsgitter mit mehreren abwechselnd angeordneten ersten und zweiten Gitterabschnitten ergibt.

[0015] Die Verwendung des röntgenabsorbierenden Materials in Form eines losen, trockenen Pulvers ermöglicht ein besonders einfaches, schnelles und zuverlässiges Befüllen der Kavitäten. Das heißt, im Vergleich zum Stand der Technik sind keine langsamen galvanischen Abscheidungsprozesse notwendig. Somit kann auch der technologische Aufwand zur Herstellung gering gehalten werden, da lediglich das lose, trockene Pulver in die Kavitäten eingefüllt werden muss. Somit sind beispielsweise auch "dicke" röntgenabsorbierende Gitterlinien mit geringem Aufwand herstellbar, da eine entsprechende Dicke (z.B. von zumindest 100 μm) nur noch maßgeblich von der Herstellung der Kavität abhängen kann (in welche das Pulver "einfach" eingefüllt wird) und eben nicht von einem Abscheidungsprozess.

[0016] Somit kann ein erfindungsgemäßes Transmissionsgitter in kurzer Zeit, aber auch mit hoher Zuverlässigkeit,

hergestellt werden. Hierbei ist die Herstellungspräzision hinsichtlich einer Geometrie des Gitters beispielsweise nur noch maßgeblich von der Herstellung der Kavitäten abhängig, in die das Pulver eingefüllt wird. Es besteht keine Abhängigkeit von etwa galvanischen Prozessparametern oder Bindemitteln. Zudem ist keine teure und aufwändige Zentrifugation nötig. Insbesondere kann dadurch eine mechanische Belastung des Substrats sowie des röntgenabsorbierenden Materials gering gehalten werden.

[0017] Außerdem wurde erkannt, dass mittels der Verwendung von loseem, trockenem Pulver auch eine hohe Homogenität der röntgenabsorbierenden Strukturen, also beispielsweise der ersten Gitterabschnitte, erzielt werden kann. Das Pulver kann in den Kavitäten optional zusätzlich verdichtet werden, um somit mögliche Gaseinschlüsse zu verhindern.

[0018] An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass optional sowohl die Substratstege entfernt und/oder mittels eines anderen Materials ersetzt werden können, als auch das lose, trockene Pulver mittels einer Beschichtung zu porösen Körpern verfestigt und/oder teilverfestigt werden kann.

[0019] Das Pulver kann zum Beispiel in Form einer granularen Materie oder in Form eines Puders vorliegen. Entsprechende Pulver können also, anders ausgedrückt, eine große Menge kleiner Partikel umfassen oder aus einer solchen Menge gebildet sein. Die Partikel können eine mittlere oder maximale Teilchengröße von weniger als 50 μm oder von weniger als 25 μm , oder von weniger als 15 μm , oder von weniger als 5 μm , oder von weniger als 1 μm aufweisen.

[0020] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung weist das Verfahren ferner ein zumindest Verfestigen des innerhalb der Kavitäten befindlichen losen, trockenen Pulvers auf. Die in Pulverform vorliegenden Partikel können dabei vollständig, oder aber auch nur teilweise verfestigt werden. Diese (Teil-)Verfestigung kann unter Anwendung eines Beschichtungsprozesses erfolgen, wobei ein hierbei verwendetes Beschichtungsmaterial in Hohlräume zwischen einzelne Partikel eindringt und damit die Partikel miteinander fest verbindet. Dadurch entstehen verfestigte poröse Strukturkörper, die eine sehr hohe Festigkeit aufweisen können. Erfindungsgemäß kann also zumindest ein Teil der Vielzahl von Partikeln innerhalb der Kavitäten in Form von verfestigten porösen Körpern mit, im Vergleich zum Substrat, höherer Röntgenstrahlungsabsorption bereitgestellt werden.

[0021] In anderen Worten weist das Verfahren optional also ein zumindest teilweises Verfestigen des innerhalb der Kavitäten befindlichen losen, trockenen Pulvers unter Anwendung eines Beschichtungsprozesses auf, wobei das innerhalb einer Kavität verfestigte Pulver jeweils einen verfestigten porösen Körper in der jeweiligen Kavität bildet, und wobei die jeweiligen verfestigten porösen Körper eine, im Vergleich zum Substrat, höhere Röntgenstrahlungsabsorption aufweisen.

[0022] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung können also die zumindest teilweise verfestigten Partikel sowohl in Form von noch nicht verfestigtem losem, trockenem Pulver, als auch in Form von mittels der Beschichtung zu porösen Körpern verfestigten Partikeln vorliegen. Das unverfestigte lose, trockene Pulver kann jeweils zwischen den verfestigten Partikeln und dem Substrat in den Kavitäten eingeschlossen angeordnet sein.

[0023] Beispielsweise kann mittels der verfestigten Partikel in den jeweiligen Kavitäten eine Art "Pfropfen" erzeugt werden, um ein Herausfallen des in der jeweiligen Kavität befindlichen losen, trockenen Pulvers zu verhindern. Die mittels der verfestigten Partikel gebildeten festen porösen Körper können somit insbesondere an einem dem Substrat abgewandten Ende der jeweiligen Kavität befindlich sein. Dies kann sich daraus ergeben, dass das im Beschichtungsprozess verwendete Beschichtungsmaterial von oben nach unten in die Kavitäten vordringt, und somit die in den Kavitäten befindlichen Partikel von oben nach unten beschichtet. Der Beschichtungsprozess kann so gesteuert werden, dass eben nur ein (oberer) Teil der Partikel beschichtet und verfestigt wird, oder sodass die gesamten Partikel vollständig beschichtet und verfestigt werden. Dementsprechend kann, im Falle einer Teilverfestigung, das in einer Kavität unbeschichtet gebliebene lose, trockene Pulver dementsprechend an einem dem Substrat zugewandten (unteren) Ende der Kavität befindlich sein. Optional kann das Beschichtungsmaterial auch dazu dienen, um einen damit erzeugten festen porösen Körper an einer Innenwand der Kavität zu befestigen. Die Innenwand der Kavität kann dabei aus Substratmaterial bestehen, gebildet von z.B. beim Strukturieren der Kavitäten übrig gebliebenen Stegen, oder aber auch aus einem anderen Material, z.B. einem Füllmaterial oder Vergussmaterial mit welchem entfernte oder teilentfernte Substratstege ersetzt wurden.

[0024] In einem erfindungsgemäßen Transmissionsgitter können also die Partikel teilweise oder vollständig in Form von mittels der Beschichtung zu porösen Körpern verfestigten Partikeln vorliegen, wobei diese verfestigten porösen Körper jeweils die ersten Gitterabschnitte bilden können.

[0025] Mittels einer vollständigen Verfestigung kann eine Steifheit und/oder eine mechanische Stabilität des Transmissionsgitters erhöht werden. Ferner kann mittels der Beschichtung die erste Gitterstruktur auf robuste Art und Weise in der Kavität befestigt werden, da die Beschichtung bis zu einer Bodenstruktur der Kavität die einzelnen Gitterlinien, also beispielsweise die Stege umfassend die verfestigten Partikel, in der Kavität befestigen kann.

[0026] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung kann der Beschichtungsprozess unter Verwendung eines flüssigen Polymers durchgeführt werden. Alternativ oder zusätzlich kann der Beschichtungsprozess ein Abscheiden von organischen oder anorga-

nischen Substanzen aus einer Gasphase beinhalten, z.B. mittels einer chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) oder z.B. mittels einer Atomlagenabscheidung (ALD). Insbesondere eine Atomlagenabscheidung ermöglicht es, mittels der Beschichtung in die Zwischenräume zwischen den Partikeln einzudringen und die Partikel an ihren Kontaktpunkten mechanisch robust und zuverlässig zu verbinden.

[0027] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung umfasst das Verfahren ferner ein Aufbringen einer Deckschicht auf die Gitterstruktur bzw. auf die erste Hauptseite des Substrats, um die Vielzahl von Partikeln in den Kavitäten einzuschließen. Gemäß Ausführungsbeispielen kann somit die Deckschicht auf der Gitterstruktur angeordnet sein, um die Partikel in den ersten Gitterabschnitten einzuschließen.

[0028] Die Deckschicht kann alternativ oder zusätzlich zu der oben beschriebenen Verfestigung des losen, trockenen Pulvers aufgebracht werden. Die Deckschicht kann in den Kavitäten bzw. in den ersten Gitterabschnitten befindliches loses, trockenes Pulver bedecken, oder abdecken, sodass das Pulver in der jeweiligen Kavität eingeschlossen und somit befestigt ist. Die Deckschicht kann ihrerseits eine Vielzahl von Partikeln beinhalten, die in Form von losem, trockenem Pulver und/oder in Form von verfestigten bzw. agglomerierten Partikeln vorliegen, um die darunterliegenden Partikel in der Kavität einzuschließen. In diesem Fall kann ein an einem dem Substrat abgewandten Ende angeordneter poröser Körper zusammen mit der Deckschicht als "doppelter Deckel" für das lose, trockene Pulver dienen. Im Sinne der Vollständigkeit sei hierbei auch erwähnt, dass ein Aufbringen einer Deckschicht auch im Fall von vollständig verfestigtem bzw. agglomeriertem Pulver in einer jeweiligen Kavität möglich ist.

[0029] Das Aufbringen der Deckschicht kann zumindest einen der folgenden Prozessschritte beinhalten: Aufbringen einer mechanisch stabilen Folie, z.B. einer Polymerfolie oder einer Metallfolie wie bspw. einer dünnen Aluminiumfolie, Aufbringen einer Polymerschicht (z.B. einer flüssigen Polymerschicht und optional anschließendes Aushärten der Polymerschicht), und/oder Aufbringen von aus der Gasphase abgeschiedenen organischen oder anorganischen Substanzen, z.B. mittels chemischer und/oder physikalischer Gasphasenabscheidung oder z.B. mittels Atomlagenabscheidung.

[0030] Es kann beim Anordnen der Deckschicht auf der Gitterstruktur auch das in den Kavitäten befindliche lose, trockene Pulver, zumindest teilweise, mittels des Deckschichtmaterials bzw. der Deckschichtbeschichtung selbst verfestigt werden.

[0031] Für eine ordnungsgemäße Funktion des Transmissionsgitters kann es von Bedeutung sein, dass die Oberfläche des Substrats insbesondere im Bereich der Substratstege zwischen den röntgenabsorbierenden Gitterlinien weitgehend frei von Partikeln des absorbierenden Materials ist. Anhäufungen absorbierender Partikel können das Absorptionsverhalten des Transmissi-

onsgitters lokal negativ beeinträchtigen und auf diese Weise Abbildungsfehler verursachen.

[0032] Um Partikel von der Substratoberfläche zu entfernen, kann bei der Herstellung des Transmissionsgitters eine Opferschicht genutzt werden. Als Opferschicht kann z. B. ein Photolack oder eine Siliziumschicht dienen. Die Opferschicht kann vor dem Erzeugen der Kavitäten aufgebracht und strukturiert werden, so dass vor dem Einbringen der Partikel die Oberflächen des Substrats einschließlich der Substratstege, ganz oder teilweise, von der Opferschicht bedeckt sind. Nach dem Erzeugen der absorbierenden Gitterlinien kann die Opferschicht durch einen geeigneten Ätzprozess selektiv zu allen anderen anwesenden Materialien entfernt werden. Dabei können auf der Opferschicht befindliche Partikel ganz oder teilweise mit abgelöst bzw. entfernt werden, so dass eine saubere Substratoberfläche zurückbleibt, die weitestgehend bzw. vollständig frei von Partikeln ist.

[0033] Alternativ oder zusätzlich kann die Oberfläche des Transmissionsgitters nach dem Aufbringen einer Deckschicht z. B. geschliffen und/oder poliert werden, um absorbierende Partikel außerhalb der röntgenabsorbierenden Gitterlinien von der Substratoberfläche zu entfernen.

[0034] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung umfasst das Verfahren ferner ein Rückdünnen einer, der ersten Hauptseite gegenüberliegenden, zweiten Hauptseite des Substrats. Somit können absorbierende Partikel auf einfache Weise auch von der anderen Seite des Substrats entfernt werden. Zudem können mechanische Eigenschaften, wie beispielsweise eine Steifigkeit des Transmissionsgitters, und / oder optische Eigenschaften, z.B. in Hinblick auf einen Strahlengang bzw. einer Länge eines entsprechenden Strahlengangs im Substratmaterial angepasst werden (z.B. bei einer Rückseitenbestrahlung). Durch die Herstellung des Transmissionsgitters mittels Einfüllen von Partikeln und der optionalen Beschichtung, welche z.B. bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden kann, kann das Substrat nur geringe innere Spannungen oder sonstige Belastungsschwachstellen aufweisen, sodass eine strukturelle Schwächung des Substrats zur Anpassung von Eigenschaften des Transmissionsgitters möglich ist.

[0035] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung umfasst das Verfahren ferner ein zumindest teilweises Entfernen von einem oder mehreren der Stege aus Substratmaterial. Die Stege können ausgehend von der ersten Hauptseite und/oder von einer der ersten Hauptseite gegenüberliegenden, zweiten Hauptseite des Substrats durchgeführt werden. Dadurch können mechanische und/oder optische Eigenschaften des Transmissionsgitters angepasst werden. Beispielsweise kann das Entfernen von Stegmaterial zwischen den ersten Gitterabschnitten dazu führen, dass die Steifigkeit des Transmissionsgitters verringert ist, sodass das Transmissionsgitter leichter gebogen werden kann.

[0036] Bereiche, in denen die Stege aus Substratma-

terial ganz oder teilweise entfernt wurden, können ganz oder teilweise mit einem Füllstoff befüllt werden, wobei der Füllstoff eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweist als die jeweils angrenzenden losen oder (teil-)verfestigten Partikel. Mittels eines entsprechenden Füllstoffs, was im Übrigen auch ein Umgebungsfluid wie z.B. Luft sein kann, kann somit eine vom Substratmaterial abweichende Röntgenabsorption eingestellt werden, um das Transmissionsgitter mit abwechselnd angeordneten Gitterabschnitten unterschiedlicher Strahlungsabsorption zu erzeugen. Alternativ oder zusätzlich kann der Füllstoff zur Anpassung von mechanischen Eigenschaften verwendet werden. Beispielsweise kann ein Füllstoff verwendet werden, der eine erhöhte Biegebarkeit des Transmissionsgitters erlaubt, aber zugleich als Abstandshalter zwischen den einzelnen, Partikel beinhaltenden, Abschnitten (erste Gitterabschnitte) dient, sodass die Abstandshalter flexible zweite Gitterabschnitte bilden, die jeweils zwischen den ersten Gitterabschnitten angeordnet sind. Das heißt, die zweiten Gitterabschnitte können zumindest teilweise mittels des Füllstoffs gebildet werden.

[0037] Beispielsweise aufgrund eines Entfernens von Stegen des Substrats kann somit ein Transmissionsgitter gemäß Ausführungsbeispielen optional keine Kavitäten im Substratmaterial mehr aufweisen. Insbesondere können die beim Herstellungsprozess erzeugten Kavitäten dahingehend nicht mehr vorhanden sein, dass diese mit den Partikeln verfüllt sind. Neue Kavitäten können dabei bspw. in den Bereichen gebildet sein, in welchen Stege aus Substratmaterial entfernt wurden, diese aber nicht mittels Füllstoff aufgefüllt sind. Auch können die Partikel dementsprechend in, mittels Füllstoff und Substrat gebildeten, Kavitäten zumindest teilweise eingeschlossen sein.

[0038] In einigen Ausführungsbeispielen können die ersten Gitterabschnitte teilweise aus den Kavitäten im Substratmaterial herausragen. In diesem Fall wäre ein entsprechender erster Gitterabschnitt also beispielsweise nur zum Teil in einer Kavität angeordnet.

[0039] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung weist eine jeweilige Kavität ein Aspektverhältnis (Breite / Tiefe) von zumindest 1:9 oder von zumindest 1:5 auf. Ferner kann optional eine Gitterperiode der Gitterstruktur weniger als 50 µm betragen. Beispielsweise kann ein Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden ersten Gitterabschnitten und / oder zwei aufeinanderfolgenden zweiten Gitterabschnitten bezüglich einer vordefinierten Einstrahlrichtung für die Röntgenstrahlung weniger als 50 µm betragen. Beispielsweise können in diesem Fall die Partikel insbesondere mittlere oder maximale Teilchengrößen von weniger als 50 µm, oder von weniger als 25 µm, oder von weniger als 15 µm, oder von weniger als 5 µm, oder von weniger als 1 µm aufweisen

[0040] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung können die Partikel zumindest Wolfram und/oder Bismuth und/oder Gold aufweisen. Ausführ-

rungsbeispiele der Erfindung ermöglichen es dabei insbesondere Wolfram effizient zu verarbeiten, was mit bisherigen Verfahren in dieser Form bisher nicht möglich war. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann Wolfram in Form von losem, trockenem Pulver mit geringem technologischen Aufwand verarbeitet werden, um daraus die hier beschriebenen ersten Gitterabschnitte zu erzeugen, welche einen sehr hohen Absorptionsgrad für Röntgenstrahlung aufweisen.

[0041] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung kann das Substrat mindestens eines der folgenden Materialien aufweisen, oder daraus bestehen: Silizium, Glas, Saphir, Keramik, oder Polymere. Somit ermöglichen Ausführungsbeispiele die Verwendung von gängigen Substratmaterialien und bieten daher eine gute Flexibilität.

[0042] Gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung können die ersten Gitterabschnitte eine fehlerstellenfreie Verteilung von Partikeln aufweisen, wobei Fehlerstellen Hohlräume sind, die um ein Mehrfaches größer sind, als eine mittlere Porengröße der porösen Körper.

Figurenkurzbeschreibung

[0043] Beispiele gemäß der vorliegenden Offenbarung werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die beiliegenden Figuren näher erläutert. Hinsichtlich der dargestellten schematischen Figuren wird darauf hingewiesen, dass die dargestellten Funktionsblöcke sowohl als Elemente oder Merkmale der offenbarungsgemäßen Vorrichtung als auch als entsprechende Verfahrensschritte des offenbarungsgemäßen Verfahrens zu verstehen sind, und auch entsprechende Verfahrensschritte des offenbarungsgemäßen Verfahrens davon abgeleitet werden können. Es zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Ansicht eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters für Röntgenstrahlung gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Beispiels eines Befüllvorgangs eines Substrats mit Kavitäten mit losem Pulver gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 3 a), b) schematische Seitenansichten von Transmissionsgittern mit einer optionalen Deckschicht und optional verfestigten Partikeln gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 4 a), b) schematische Ansichten von Transmissionsgittern mit optional gedünntem Substrat und optional teilweise entfernten Substratstegen gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;

spielen der vorliegenden Erfindung;

- Fig. 5 ein Transmissionsgitter gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 6 a)-h) schematische Ansichten von Transmissionsgittern und zugehörigen Zwischenprodukten bei einem Herstellungsverfahren gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 7 a)-t) schematische Ansichten weiterer optionaler Ausgestaltungen von Transmissionsgittern gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung; und
- Fig. 8 a)-c) ein Beispiel für Röntgentransmissionsgitter hergestellt durch Einzentrifugation einer Metallpartikelsuspension.

Detaillierte Beschreibung der Beispiele gemäß den Figuren

[0044] Bevor nachfolgend Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung im Detail anhand der Zeichnungen näher erläutert werden, wird darauf hingewiesen, dass identische, funktionsgleiche oder gleichwirkende Elemente, Objekte und/oder Strukturen in den unterschiedlichen Figuren mit den gleichen oder ähnlichen Bezugszeichen versehen sind, so dass die in unterschiedlichen Ausführungsbeispielen dargestellte Beschreibung dieser Elemente untereinander austauschbar ist bzw. aufeinander angewendet werden kann.

[0045] Fig. 1 zeigt eine schematische Ansicht eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters 100 für Röntgenstrahlung gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung.

[0046] Das Transmissionsgitter 100 weist ein Substrat 110 mit einer Gitterstruktur 120 auf. Die Gitterstruktur 120 weist mehrere abwechselnd nebeneinander angeordnete erste und zweite Gitterabschnitte 122, 124 auf. Die ersten Gitterabschnitte 122 beinhalten bzw. weisen eine Vielzahl von (hier nur schematisch angedeuteten) Partikeln 130 auf, die in Form von losem, trockenem Pulver und/oder in Form von mittels einer Beschichtung verfestigten Partikeln vorliegen können. Ferner weisen die ersten Gitterabschnitte 122 eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung auf als die zweiten Gitterabschnitte 124, um so das mikrostrukturierte Transmissionsgitter 100 mit unterschiedlichen Strahlungsabsorptionskoeffizienten für Röntgenstrahlung zu bilden.

[0047] In anderen Worten sind die ersten und zweiten Gitterabschnitte 122, 124 also alternierend angeordnet, um somit stärker und weniger stark absorbierende Linien des Transmissionsgitters 100 zu bilden. Die zweiten Gitterabschnitte 124 können Stege 114 aus Substratmaterial aufweisen oder aus solchen Stegen 114 bestehen.

Wie später noch näher erläutert wird, können derartige Stege 114 auch ganz oder teilweise entfernt sein, und sie können ganz oder teilweise durch ein anderes Material, z.B. durch einen Füllstoff oder ein Vergussmaterial, ersetzt sein.

[0048] Unter Bezugnahme auf Fig. 1 soll im Folgenden ferner ein Herstellungsverfahren gemäß Ausführungsbeispielen erläutert werden. Das Verfahren umfasst dabei ein Bereitstellen des Substrats 110 und ein Erzeugen einer Gitterstruktur 120 in bzw. auf dem Substrat 110. Die Gitterstruktur 120 kann erzeugt werden, indem eine Vielzahl von periodisch angeordneten Kavitäten 112 in eine erste Hauptseite des Substrats 110 strukturiert wird, wobei zwischen den Kavitäten 112 jeweils einzelne Stege 114 aus Substratmaterial bestehen bleiben.

[0049] Die Kavitäten 112 können dann ebenjene Bereiche sein, die von dem Substrat 110 mit aufeinanderfolgenden Stegen 114 begrenzt sind. Ferner umfasst das Verfahren ein Verfüllen der Kavitäten 112 mit einer Vielzahl von Partikeln 130 in Form von losem, trockenem Pulver. Die Kavitäten 112 können hierbei zumindest teilweise, vorzugsweise aber vollständig mit dem losen, trockenen Pulver befüllt werden.

[0050] Erfindungsgemäß weisen die Partikel 130 eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung auf als das Substrat 110. Somit wird ein Transmissionsgitter 120 erzeugt, welches abwechselnd erste Gitterabschnitte 122 und zweite Gitterabschnitte 124 aufweist, wobei die ersten Gitterabschnitte 122 eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung aufweisen als die zweiten Gitterabschnitte 124. Die ersten Gitterabschnitte 122 können dabei mittels der zuvor erwähnten Partikel 130 gebildet sein, die zunächst in Form von losem, trockenem Pulver in die Kavitäten 112 eingebracht, und anschließend optional verfestigt und/oder teilverfestigt werden können. Die zweiten Gitterabschnitte 124 können aus den, zwischen den Kavitäten 112 verbleibenden, Stegen 114 aus Substratmaterial gebildet werden.

[0051] Sowohl die mit den Partikeln 130 befüllten Kavitäten 112, als auch die in den Kavitäten 112 befindlichen losen und/oder (teil-)verfestigten Partikel 130 selbst, können im Rahmen der vorliegenden Offenbarung als erste Gitterabschnitte 122 bezeichnet werden.

[0052] Im Folgenden wird Bezug genommen auf die Figuren 2 a), b) und 3 a), b).

[0053] Die Figuren 2a) und 2b) zeigen eine schematische Darstellung eines Beispiels eines Befüllvorgangs von, in einem Substrat vorhandenen, Kavitäten mit losem, trockenem Pulver gemäß Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung. Fig. 2a) zeigt ein Substrat 210 mit Kavitäten 212, sowie eine Vielzahl von Partikeln 230 in Form eines losen, trockenen Pulvers. Fig. 2b) zeigt das Substrat 210 mit eingefüllten Partikeln 230, wobei das Partikelpulver 230 die Kavitäten 212 weitestgehend vollständig ausfüllt.

[0054] Die Figuren 3a) und 3b) zeigen schematische Seitenansichten von erfindungsgemäßen Transmissionsgittern 300a, 300b mit einer optionalen Deckschicht

340a bzw. optional verfestigten Partikeln.

[0055] Fig. 3a) zeigt ein Transmissionsgitter 300a, aufweisend ein Substrat 310a und eine Gitterstruktur 320a. Die Gitterstruktur 320a weist erste Gitterabschnitte 322a auf, die durch eine Vielzahl von Partikeln gebildet werden, die hier in Form von losem Pulver 330a, z.B. Absorberpulver, vorliegen. Die Gitterstruktur 320a weist zweite Gitterabschnitte 324a auf, die zwischen den ersten Gitterabschnitten 322a angeordnet sind, und die beispielsweise in Form von Stegen aus Substratmaterial ausgestaltet sein können. Das Transmissionsgitter 300a kann optional eine Deckschicht 340a aufweisen. Die Deckschicht 340a kann beispielsweise in Form einer Polymerfolie und/oder in Form eines Polymers, z.B. in Form eines aushärtbaren Epoxidharzes, ausgestaltet sein. Alternativ oder zusätzlich kann die Deckschicht 340a mittels aus der Gasphase, z.B. unter Anwendung eines CVD-Prozesses, abgeschiedenen organischen oder anorganischen Substanzen gebildet werden.

[0056] Fig. 3b) zeigt eine alternative Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Transmissionsgitters 300b mit einem Substrat 310b und einer Gitterstruktur 320b. Hier sind die ersten Gitterabschnitte 322b in Form von zumindest teilweise, oder vorzugsweise vollständig, verfestigten Partikeln 330b ausgestaltet. Die zunächst in Pulverform vorliegenden Partikel 330b können beispielsweise unter Anwendung einer Atomlagenabscheidung (ALD) beschichtet, und dadurch (teil-)verfestigt werden. Die (teil-)verfestigten Partikel 330b des ursprünglich losen, trockenen Pulvers 330a können dabei eine Vielzahl von festen porösen Körpern bilden, welche die ersten Gitterabschnitte 322b und somit die röntgenstrahlungsabsorbierenden Linien des Transmissionsgitters 300b bilden können. Auch hier können die zweiten Gitterabschnitte 324b in Form von Stegen aus Substratmaterial gebildet sein.

[0057] Fig. 3b) zeigt somit also ein Ausführungsbeispiel, bei dem ein zuvor loses Absorberpulver durch Umhüllung der Pulverpartikel mittels eines geeigneten (z.B. ALD) Beschichtungsverfahrens zu festen porösen Strukturkörpern mit hoher Röntgenstrahlungs-Absorption umgewandelt wird. Durch die Beschichtung werden die Partikel 330a dabei an ihren Kontaktpunkten mechanisch verbunden. Zur mechanischen Verbindung bzw. Verfestigung der zunächst losen, trockenen Pulverschüttung, können beispielsweise flüssige Polymere oder aus der Gasphase (z.B. unter Anwendung eines ALD-Verfahrens) abgeschiedene organische oder anorganische Substanzen verwendet werden. Diese dringen in die Zwischenräume zwischen den einzelnen Partikeln 330a ein und verbinden die Partikel 330a an deren jeweiligen Kontaktpunkten zu den zumindest teilweise, oder vorzugsweise vollständig, verfestigten Partikeln 330b miteinander.

[0058] Die unter Bezugnahme auf die Figuren 3a) und 3b) beschriebenen Ausführungsbeispiele können untereinander kombinierbar sein. Das heißt, die in Figur 3a) beispielhaft beschriebenen losen Partikel unterhalb der

Deckschicht 340a können (teil-)verfestigt sein. Ebenso kann auf der in Figur 3b) gezeigten Gitterstruktur 320b eine Deckschicht 340a angeordnet sein.

[0059] Alle hierin beschriebenen Ausführungsbeispiele weisen ein Substrat mit einer Gitterstruktur auf. Als Ausgangsmaterial kann ein planares Substrat aus einem Material mit geringer Röntgenabsorption dienen. Zum Erzeugen der Gitterstruktur kann das Substrat beispielsweise mit geeigneten, periodisch angeordneten, Kavitäten (z.B. 112, 212) versehen werden, die mit losem, trockenem Pulver mit hoher Röntgenabsorption gefüllt werden (siehe Fig. 2a)).

[0060] Geeignete Materialien für Substrate sind beispielsweise Silizium, Glas, Saphir, Keramiken oder Polymere. Geeignete Pulver sind beispielsweise Wolfram, Bismuth oder Gold. Die Periodizität der Gitterabschnitte beträgt bspw. höchstens 50 µm. Optional beträgt das Aspektverhältnis der Kavitäten mindestens 9, bevorzugt mindestens 5.

[0061] Erfindungsgemäß wird das lose Pulver (z.B. 112, 212, 330a) trocken in die Kavitäten (z.B. 112, 212) eingebracht (siehe Fig. 2b)). Anschließend kann optional die lose Pulverschüttung durch eine geeignete auf dem Pulver aufliegende Deckschicht (z.B. 304a) mechanisch in den Kavitäten eingeschlossen werden (siehe Fig. 3a)) und/oder durch ein geeignetes Verfahren mechanisch (teil-)verfestigt werden (siehe Fig. 3 b)).

[0062] Geeignete Deckschichten umfassen bspw. (Polymer-)Folien-und/oder Polymere wie z.B. aushärtbare Epoxidharze, sowie aus einer Gasphase (z.B. CVD) abgeschiedene organische und anorganische Substanzen. Zur mechanischen Verfestigung eines teilweisen oder des ganzen Volumens der losen Pulverschüttung können ferner optional flüssige Polymere oder aus der Gasphase (z.B. ALD) abgeschiedene organische und anorganische Substanzen verwendet werden, welche in die Zwischenräume zwischen den Partikeln eindringen und die Partikel an ihren Kontaktpunkten mechanisch verbinden können.

[0063] Im Folgenden wird Bezug genommen auf die Figuren 4a) und 4b), in denen schematische Ansichten eines Transmissionsgitters 400a gezeigt sind, die ein auf der Rückseite rückgedünntes Substrat 410a aufweisen. In diesem Ausführungsbeispiel können optional die zwischen den Kavitäten befindlichen Substratstege ganz oder teilweise entfernt werden.

[0064] Fig. 4a) zeigt ein Transmissionsgitter 400a mit einem gedünnten Substrat 410a sowie mit einer Gitterstruktur 420a mit ersten und zweiten Gitterabschnitten 422a, 424a. Die ersten Gitterabschnitte 422a sind in Form einer Vielzahl von Partikeln 430a ausgestaltet, wie es beispielsweise zuvor unter Bezugnahme auf Figur 3b) beschrieben wurde. In anderen Worten zeigt Figur 4a) ein Transmissionsgitter 400a nach einem Rückdünnen bzw. teilweisen Entfernen des verbleibenden rückseitigen Substrats.

[0065] Figur 4b) zeigt das Transmissionsgitter 400b nach dem Ausführen eines weiteren erfindungsgemäßen

Verfahrensschrittes. Hierbei können die, zwischen den (teil-)verfestigten Partikeln befindlichen, Stege aus Substratmaterial, d.h. die zweiten Gitterabschnitte 424b, teilweise entfernt werden. Die Stege aus Substratmaterial können ganz oder teilweise entfernt werden. Außerdem können die Stege aus Substratmaterial sowohl von einer, als auch von beiden Seiten des Transmissionsgitters her entfernt werden.

[0066] In anderen Worten zeigen die Figuren 4a) und 4b) denkbare Ausführungsbeispiele, in denen nach der Verfestigung des losen, trockenen Pulvers zunächst das verbleibende Substrat auf der Rückseite gedünnt bzw. teilweise entfernt wird (Fig. 4a)) und danach optional die dazwischenliegenden Stege, z.B. mittels eines geeigneten Ätzprozesses, ganz oder teilweise von einer oder beiden Seiten entfernt werden (siehe Fig. 4b)). Das Rückdünnen des Substrats ist optional, es erleichtert jedoch ein Entfernen der Stege von der Rückseite her.

[0067] Durch die in Figur 4b) gezeigte Ausführungsform lässt sich der Kontrast zwischen den röntgenabsorbierenden und den weniger röntgenabsorbierenden Linien des Gitters erhöhen. Darüber hinaus erlaubt das (teilweise) Entfernen der Substratstege das mechanische Biegen des Gitters, z.B. auf einen definierten Radius. Die durch das Entfernen des Substratmaterials entstehenden Zwischenräume können, z.B. zur Erhöhung der mechanischen Stabilität, optional mit einer geeigneten Vergussmasse mit niedriger Röntgenabsorption (z.B. Epoxidharz, PDMS oder anderer Polymere) aufgefüllt werden.

[0068] Ein spezifischer Lösungsweg gemäß Ausführungsbeispielen für die Herstellung von Röntgentransmissionsgittern kann beispielsweise beinhalten, dass zuerst Kavitäten mit einer gewünschten Gitterperiode in einem Substrat erzeugt werden, z.B. mittels eines geeigneten Hochratenätzprozesses. In einem weiteren Schritt kann ein Röntgenabsorberpulver (als Beispiel für ein loses Pulver), wie z.B. Wolfram- oder Bismuthpulver, trocken in die Kavitäten eingebracht werden. Dies kann z.B. erfolgen, indem in einer speziellen Vorrichtung das trockene Pulver, z.B. zusammen mit Gummikugeln, auf die Substratoberfläche dosiert wird, wobei die Partikel, optional durch Überlagerung einer niederfrequenten Schwingung mit Ultraschall, in die Kavitäten transportiert und verdichtet werden können.

[0069] Figur 5 zeigt ein mittels des hierin beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahrens hergestelltes Transmissionsgitter 500. Das Transmissionsgitter 500 ist hier beispielhaft mit Wolframpartikeln 530 befüllt. Die wenigen auf den Siliziumstegen 514 verbleibenden Wolframpartikel (kleine Punkte) stören die Funktion des Transmissionsgitters 500 nicht. Größere Ansammlungen von Wolframpartikeln 530 können hingegen durchaus störend sein. Zur Vermeidung solcher größerer Ansammlungen kann bspw., wie zuvor erläutert, bei der Herstellung des Transmissionsgitters 500 z. B. eine Opferschicht genutzt werden, welche vor dem Erzeugen der Kavitäten aufgebracht und strukturiert werden kann, so

dass vor dem Einbringen der Partikel 530 die Oberflächen des Substrats einschließlich der Substratstege 514 ganz oder teilweise von der Opferschicht bedeckt sind. Nach dem Erzeugen der absorbierenden Gitterlinien im Substrat kann die Opferschicht durch einen geeigneten Ätzprozess selektiv zu allen anderen anwesenden Materialien entfernt werden. Dabei können auch entsprechend überbleibende unerwünschte Partikelansammlungen beseitigt werden. Alternativ oder zusätzlich kann die Oberfläche des Transmissionsgitters nach dem Aufbringen einer Deckschicht geschliffen und/oder poliert werden, um absorbierende Partikel 530 außerhalb der röntgenabsorbierenden Gitterlinien von der Substratoberfläche zu entfernen.

[0070] In einem optionalen weiteren Verfahrensschritt kann die Oberfläche des Substrats, z.B. durch Rakeln, von überschüssigem Pulver befreit werden. Wie weiter oben erwähnt, kann das lose Pulver optional mittels eines Beschichtungsprozesses ganz oder teilweise verfestigt werden. Dies kann beispielsweise unter Anwendung eines ALD-Prozesses mit z.B. Al_2O_3 erfolgen, wodurch das zuvor lose, trockene Pulver zu festen porösen Mikrostrukturen verfestigt werden kann. Prinzipiell eignen sich darüber hinaus alle mittels Atomlagenabscheidung (ALD) abscheidbaren mechanisch stabilen Schichten, wie beispielsweise Metalle, Metalloxide und -nitride sowie Polymere und Kombinationen davon. In anderen Worten können Ausführungsbeispiele beliebige derartige Materialien als Beschichtungsmaterial umfassen.

[0071] Nachfolgend zeigen die Figuren 6a) bis 6h) jeweils schematische Ansichten einzelner Verfahrensschritte zum Herstellen von erfindungsgemäßen Transmissionsgittern inklusive zugehöriger Zwischenprodukte.

[0072] Figur 6a) zeigt ein Substrat 610, welches als Ausgangsprodukt für ein erfindungsgemäßes Herstellungsverfahren dienen kann. Das Substrat 610 kann Silizium, Glas, Saphir, Keramik und/oder Polymere aufweisen oder aus einem solchen Material bestehen.

[0073] Figur 6b) zeigt einen Prozessschritt zum Erzeugen einer Gitterstruktur 601 in oder auf dem Substrat 610. In diesem nicht-limitierenden Beispiel kann die Gitterstruktur 601 erzeugt werden, indem eine Vielzahl von Kavitäten 612 in eine erste Hauptseite 611 des Substrats 610 strukturiert wird. Dies kann beispielsweise mittels Ätzen, z.B. unter Anwendung eines Hochratenätzprozesses (z.B. reaktives Ionentiefenätzen), ausgeführt werden. Alternativ oder zusätzlich können lithographische Prozesse, z.B. unter Verwendung von Fotolacken, zum Einsatz kommen. Die Kavitäten 612 können ein Aspektverhältnis, bezüglich Breite / Tiefe, von zumindest 1:9 oder zumindest 1:5 aufweisen.

[0074] Zwischen den Kavitäten 612 können jeweils Stege 614 bestehen bleiben. Sofern die Kavitäten 612, wie zuvor beschrieben, direkt in das Substrat 610 strukturiert werden, so können die Stege 614 dementsprechend aus Substratmaterial gebildet sein, welches beim Erzeugen der Kavitäten 612 stehengeblieben ist. In al-

ternativen Ausführungsformen können diese verbliebenen Substratstege 614 ganz oder teilweise entfernt werden, und anschließend optional ganz oder teilweise mit einem Füllstoff aufgefüllt werden. In diesem Fall würden die zwischen den Kavitäten 612 angeordneten Stege 614 ganz oder teilweise ebenjenen Füllstoff beinhalten.

[0075] Die Kavitäten 612 werden vorzugsweise derart erzeugt, dass sie periodisch in dem Substratmaterial angeordnet sind. Das heißt, es kann eine Vielzahl von Kavitäten 612 erzeugt werden, die alle im gleichen Abstand zueinander angeordnet sind. Die Gitterstruktur 601 kann beispielsweise eine Gitterperiode von weniger als $50\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen. Eine Dicke der Kavitäten 612 kann zumindest $100\text{ }\mu\text{m}$ oder mehr betragen, wodurch eine besonders gute Absorption von Röntgenstrahlung erreicht werden kann. Die Dicke bemisst sich dabei in Einfallrichtung der abzuhaltenden Röntgenstrahlung.

[0076] Figur 6c) zeigt einen weiteren Prozessschritt, in dem die Kavitäten 612 mit Partikeln 630 in Form von losem, trockenem Pulver verfüllt werden können. Die Kavitäten 612 können hierbei ganz oder teilweise verfüllt werden. Hierfür kann das trockene, lose Partikelpulver 630 auf einer, den Öffnungen der Kavitäten 612 zugewandten, Oberfläche des Substrats 610, bzw. auf der ersten Hauptseite 611 des Substrats 610, aufgeschüttet werden. Anschließend können Schwingungen eines ersten Frequenzbereichs (z.B. 25 Hz bis 150 Hz) mit Schwingungen eines zweiten Frequenzbereichs (z.B. 10 kHz bis 100 kHz) überlagert werden, um die trockenen, losen Partikel 630 in die Kavitäten 612 zu befördern und optional zu verdichten.

[0077] Anschließend können überschüssige lose Partikel 630, die sich beispielsweise noch außerhalb der Kavitäten 612 befinden können, entfernt werden, sodass die befüllten Kavitäten 612 mit der Substratoberfläche zumindest näherungsweise fluchten.

[0078] Optional können zusammen mit dem trockenen, losen Partikelpulver 630 kugelförmige Elemente (z.B. Gummikugeln) auf die Substratoberfläche eingebracht werden, wobei die kugelförmigen Elemente einen Durchmesser aufweisen können, der mindestens dreifach größer ist als eine maximale Breite oder ein maximaler Durchmesser einer jeweiligen Kavität 612. Mittels der kugelförmigen Elemente können gegebenenfalls gebildete Agglomerate der losen, trockenen Partikel 630 aufgebrochen werden. Dies kann insbesondere mittels obig erläuteter Schwingungen durchgeführt werden, sodass die kugelförmigen Elemente sich bewegen und dadurch Inhomogenitäten des losen, trockenen Pulvers 630 in den Kavitäten 612 beseitigen. Anschließend werden die kugelförmigen Elemente wieder entfernt. Alternativ oder zusätzlich können die auf der Substratoberfläche befindlichen überschüssigen, losen Partikel 630 mittels Rakeln entfernt werden.

[0079] Ganz allgemein können durch eine Verwendung von überlagerten Schwingungen und/oder kugelförmigen Elementen, aber auch ohne Anwendung solcher optionalen Schritte, erste Gitterabschnitte gebildet

werden, die eine weitestgehend gasblasenfreie und homogene Verteilung von Partikeln 630 aufweisen.

[0080] Die Partikel 630 können dabei, wie zuvor erläutert, zumindest eines der Materialien Wolfram, Bismuth, und/oder Gold aufweisen oder aus einem dieser Materialien, in diesem Herstellungsschritt in Pulverform, bestehen.

[0081] Unter Bezugnahme auf Figur 6c) kann also bis hierhin festgehalten werden, dass das Transmissionsgitter 600 ein Substrat 610 und eine Gitterstruktur 601 aufweist. Die Gitterstruktur 601 wiederum weist eine Vielzahl von abwechselnd angeordneten ersten und zweiten Gitterabschnitten 621, 622 auf. Die ersten Gitterabschnitte 621 weisen eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung auf als die zweiten Gitterabschnitte 622. Die ersten Gitterabschnitte 621 können in Form von mit Partikeln 630 gefüllten Kavitäten 612 ausgestaltet sein. Die zweiten Gitterabschnitte 624 können in Form von, zwischen den Kavitäten 612 angeordneten, Stegen 614 ausgestaltet sein. Die Stege 614 können Substratmaterial und/oder einen Füllstoff aufweisen.

[0082] In den Figuren 6a) bis 6h) sind rein beispielhaft lediglich zwei Kavitäten 612 und drei Stege 614 gezeigt. Das erfindungsgemäße Transmissionsgitter 600 kann aber deutlich mehr Kavitäten 612 und Stege 614, bzw. deutlich mehr abwechselnd angeordnete erste und zweite Gitterabschnitte 621, 622, aufweisen. Die ersten Gitterabschnitte 621, die bis zu dem in Figur 6c) gezeigten Verfahrensschritt mittels eines trockenen Partikelpulvers 630 gebildet sind, können in optionalen weiteren Verfahrensschritten beschichtet und verfestigt werden, und/oder mittels einer Abdeckschicht in den Kavitäten 612 eingeschlossen werden. Dies soll nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 6d) und 6e) erläutert werden.

[0083] Die Figuren 6d) bis 6f) zeigen optionale weitere Verfahrensschritte, mit welchen eine Deckschicht 640 auf die erste Hauptseite 611, bzw. auf die Gitterstruktur 601 umfassend die ersten und zweiten Gitterabschnitte 621, 622, aufgebracht werden kann. Die Deckschicht 640 kann beispielsweise in Form einer Polymerfolie, einer aushärtbaren Polymerschicht, oder in Form von aus der Gasphase (z.B. mittels CVD oder ALD) abgeschiedenen organischen oder anorganischen Substanzen aufgebracht werden. Mittels der Deckschicht 640 können die Partikel 630 in den Kavitäten 612 eingeschlossen werden.

[0084] Wie in Figur 6d) gezeigt ist, kann die Deckschicht 640 die Gitterstruktur 601 komplett überspannen. Die Deckschicht 640 kann hierbei auf den ersten und zweiten Gitterabschnitten 621, 622 obenauf liegen. Dies wäre beispielsweise bei Polymerfolien der Fall.

[0085] Sofern die Deckschicht 640 aber beispielsweise mittels eines Beschichtungsverfahrens aufgebracht wird, so kann das verwendete Beschichtungsmaterial, z.B. ein flüssiges Polymer, teilweise in die Kavitäten 612 eindringen, wie dies beispielhaft in Figur 6e) gezeigt ist. Es wäre auch vorstellbar, dass das Beschichtungsmate-

rial der Deckschicht 640 vollständig in die Kavitäten 612 eindringt, wie es beispielhaft in Figur 6f) dargestellt ist. Das Beschichtungsmaterial kann die in den Kavitäten 612 befindlichen Partikel 630 durchsetzen und dabei als eine Beschichtung für die Partikel 630 wirken.

[0086] Somit kann das in den Kavitäten 612 befindliche Partikelpulver 630 mittels der Deckschicht 640, bzw. mittels dem dabei verwendeten Beschichtungsmaterial, teilverfestigt oder vollständig verfestigt werden. Bei einer Teilverfestigung (Figur 6e)) können die Partikel 630 poröse Körper 632d bilden, die im Bereich der ersten Hauptseite 611 des Substrats in den Kavitäten 612 angeordnet sind. Darunterliegende unbeschichtet gebliebene lose Partikel 634 können in den Kavitäten 612 eingeschlossen werden. Im Ergebnis ergibt sich ein Transmissionsgitter 601 mit einer Deckschicht 640, die die ersten und zweiten Gitterabschnitte 621, 622 bedeckt, wobei die ersten Gitterabschnitte 621 teilverfestigtes Partikelpulver 630 aufweisen.

[0087] Im Falle einer vollständigen Durchdringung (Figur 6f)) des Partikelpulvers 630 mit dem Beschichtungsmaterial, kann das gesamte Partikelpulver 630 verfestigt werden, sodass weitestgehend alle Partikel mittels der Beschichtung zu festen porösen Körpern 632d verfestigt sind. Im Ergebnis ergibt sich ein Transmissionsgitter 601 mit einer Deckschicht 640, die die ersten und zweiten Gitterabschnitte 621, 622 bedeckt, wobei die ersten Gitterabschnitte 621 vollständig verfestigtes Partikelpulver 630, bzw. feste poröse Strukturkörper 632d, aufweisen.

[0088] Alternativ dazu kann das trockene Partikelpulver 630, wie es beispielhaft in den Figuren 6g) und 6h) gezeigt ist, auch unabhängig von einer Deckschicht 640, mittels einer Beschichtung 650 teilverfestigt oder vollständig verfestigt werden. Hierfür kann beispielsweise ein Beschichtungsverfahren verwendet werden, wobei das Partikelpulver 630 mittels des dabei verwendeten Beschichtungsmaterials zu festen porösen Körpern 632e verfestigt werden kann. Zur mechanischen Verbindung bzw. Verfestigung der zunächst losen, trockenen Pulverschüttung 630, können beispielsweise flüssige Polymere oder aus der Gasphase (z.B. mittels ALD/CVD) abgeschiedene organische oder anorganische Substanzen verwendet werden. Diese dringen in die Zwischenräume zwischen den einzelnen Partikeln ein und verbinden die Partikel an deren jeweiligen Kontaktpunkten miteinander.

[0089] Zusammenfassend können also die ersten Gitterabschnitte 621 der Gitterstruktur 601 mittels in den Kavitäten 612 befindlichen Partikeln gebildet werden, die entweder nur in Form eines losen, trocken Pulvers 630 vorliegen, und optional mit einer Deckschicht 640 in den Kavitäten 612 eingeschlossen sein können, um sie gegen ein Herausfallen zu sichern. Alternativ oder zusätzlich kann das Partikelpulver 630 teilverfestigt sein, wobei eine Mischung aus festen porösen Körpern 632d, 632e und unverfestigtem, d.h.losem, trockenen Pulver 630 vorliegt, wobei diese Mischung die ersten Gitterabschnitte 621 bildet. Auch hier kann optional eine Deckschicht

640 vorhanden sein. Alternativ kann das Partikelpulver 630 vollständig verfestigt sein, wobei feste poröse Körper 632d, 632e vorliegen, die dann wiederum die ersten Gitterabschnitte 621 bilden. Auch hier kann optional eine Deckschicht 640 vorhanden sein.

[0090] In den oben beschriebenen Verfahrensschritten wurden die ersten Gitterabschnitte 621 erzeugt, indem Kavitäten 612 in das Substrat 610 strukturiert wurden, die anschließend mit trockenem Partikelpulver 630 gefüllt wurden, wobei das Partikelpulver 630 (teil-)verfestigt wurde. Die zweiten Gitterabschnitte 622 lagen dabei in Form von Stegen 614 aus Substratmaterial vor, das während der Strukturierung des Substrats bestehen geblieben ist. Das erfindungsgemäße Verfahren kann optionale weitere Verfahrensschritte aufweisen. Beispielsweise können die Stege 614 aus Substratmaterial ganz oder teilweise entfernt werden. Die entfernten Bereiche können dann, ebenfalls ganz oder teilweise, mit einem Füllstoff aufgefüllt werden. In diesem Falle werden Stege 614 aus Füllstoff erzeugt.

[0091] Die Figuren 7a) bis 7t) zeigen unterschiedliche Möglichkeiten, wie mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens ein Transmissionsgitter 700 mit ersten und zweiten Gitterabschnitten 721, 722 erzeugt werden kann. In allen Figuren 7a) bis 7t) sind Transmissionsgitter mit 700, erste Gitterabschnitte mit 721, zweite Gitterabschnitte mit 722, Substrate mit 710, Stege mit 714, Partikel mit 730, Deckschichten mit 740 und Füllstoffe, bzw. Vergussstoffe, mit 750 bezeichnet. Im Vergleich zu den Figuren 6a) bis 6h) sind die die Partikel 730 hier vereinfacht dargestellt. Die Partikel 730 können jedoch auch hier in Form von losem, trockenem Pulvern oder in Form von festen porösen Körpern vorliegen, die aus mittels einer Beschichtung teilverfestigten oder vollständig verfestigten, Partikeln erzeugt werden können.

[0092] Fig. 7a) zeigt zunächst eine Ausführungsform, wie sie zuvor unter Bezugnahme auf die Figuren 6d) bis 6f) beschrieben wurde. Optional kann das Substrat 710 von einer Rückseite her gedünnt werden (Figur 7b)). Ferner können optional die, zwischen den ersten Gitterabschnitten 721 angeordneten, Stege 714 aus Substratmaterial, zumindest teilweise entfernt werden (Figur 7c)). Alternativ dazu können die Stege 714 auch ganz entfernt werden, siehe Fig. 7 d). Das Entfernen der Stege 714 kann, wie in den Figuren exemplarisch gezeigt ist, von einer Rückseite her geschehen. Alternativ oder zusätzlich können die Stege 714 aber auch von einer Vorderseite des Substrats 710 her ganz oder teilweise entfernt werden. In diesen Fällen können die zweiten Gitterabschnitte 722 in Form von Luftspalten zwischen den ersten Gitterabschnitten 721 (z.B. (teil-verfestigte) Partikel) gebildet sein.

[0093] Wie in den Figuren 7e) und 7f) gezeigt ist, können die entfernten Substratbereiche optional wieder mittels eines Füllstoffs 750, z.B. mit einer Vergussmasse, ganz oder teilweise aufgefüllt werden. In diesem Fall können die zweiten Gitterabschnitte 722 in Form von Stegen 714 aus Füllmaterial und/oder Substratmaterial zwi-

schen den ersten Gitterabschnitten 721 (z.B. (teil-verfestigte) Partikel) gebildet sein.

[0094] Figur 7g) zeigt eine Ausführungsform ohne Abdeckschicht. Auch hier kann das Substrat 710 optional von einer Rückseite her gedünnt werden (Figur 7h)). Ferner können Stege 714 aus Substratmaterial, von einer oder beiden Substratseiten her, ganz (Figur 7j)) oder teilweise (Figur 7i)) entfernt werden. In beiden Fällen kann auch wiederum das Substrat 710 rückseitig gedünnt werden (Figur 7k)). Optional kann die Entfernung der Stege 714 aus Substratmaterial auch von der Rückseite des Substrats 710 her, d.h. gegenüberliegend zur ersten Hauptseite 711, ausgeführt werden (Figur 7l)). Ferner alternativ kann die Entfernung der Stege 714 aus Substratmaterial auch ausgehend von beiden Seiten des Substrats 710 erfolgen, wobei aufgrund einer unvollständigen Entfernung optional ein Abschnitt 715 aus Substratmaterial bestehen bleiben kann (Figuren 7m) und 7n)).

[0095] Auch in diesen Fällen kann entferntes Substratmaterial wiederum mittels eines Füllstoffs 750 aufgefüllt werden (Figuren 7o) bis 7t)). Je nachdem, ob die Bereiche entfernten Substratmaterials ganz oder teilweise mit dem Füllstoff 750 aufgefüllt sind, können die zweiten Gitterabschnitte 722 den Füllstoff 750 und/oder Substratmaterial aufweisen. In allen Fällen, in denen Füllstoff 750 verwendet wird, kann dieser Füllstoff 750 eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweisen als die Partikel 730.

[0096] Wie in den Figuren 7a) bis 7t) außerdem ersichtlich ist, können die ersten Gitterabschnitte 721, die mittels der Partikel 730 gebildet sind, auch nur teilweise in einer Kavität im Substrat 710 angeordnet sein. Die Kavitäten können dabei mittels Substratmaterial gebildet sein, oder auch mittels des Füllstoffs 750, wobei die ersten Gitterabschnitte 721 somit teilweise in Kavitäten, gebildet mittels Substratmaterial, und teilweise in Kavitäten, gebildet mittels Füllstoff 750, angeordnet sein können.

[0097] Wie in den Figuren 7a) bis 7t) außerdem ersichtlich ist, können die zweiten Gitterabschnitte 721 mittels Substratmaterial, mittels Substratmaterial und Füllstoff 750, oder nur mittels Füllstoff 750 gebildet sein, so dass diese jeweils abwechselnd mit den ersten Gitterabschnitten 721 zur Bildung des Transmissionsgitters 700 angeordnet sind.

[0098] An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass Ausführungsbeispiele also ganz allgemein eine besonders kostengünstige Herstellung gegenüber bestehenden Verfahren schaffen. Ferner kann optional eine besonders homogene Verfüllung, insbesondere durch Vermeidung von Gasblaseneinschlüssen, erreicht werden. Darüber hinaus ist eine hohe Materialvielfalt verwendbar, insbesondere Wolfram als besonders vorteilhaftes Absorbermaterial.

[0099] Wie zuvor ausführlich erläutert wurde, ermöglichen Ausführungsbeispiele eine trockene Einfüllung von trockenen, losen Partikeln in Kavitäten, sodass Gasblaseneinschlüsse, wie z.B. im Zuge von Nassverfüllung, vermieden werden können. Damit können besonders ho-

mogene Strukturen erzeugt werden.

[0100] Neben der hohen Flexibilität in der Materialwahl ermöglichen Ausführungsbeispiele ferner die Realisierung sehr geringer Prozesszeiten. Außerdem können hohe Aspektverhältnisse (z.B. der Kavitäten und damit der ersten Gitterabschnitte) ermöglicht werden. Es können insbesondere Absorbermaterialien unabhängig, oder im Wesentlichen unabhängig, von ihrem Schmelzpunkt (z.B. bezüglich eines Schmelzpunkts des Substratmaterials) verwendet werden. Die erfindungsgemäße Verwendung von Beschichtungsprozessen ermöglicht insbesondere eine bezüglich thermischer Belastung "schonende" Prozessierung (z.B. mittels Durchführung der Beschichtung bei moderaten Temperaturen) des Transmissionsgitters, sodass auch thermisch empfindliche Materialien verwendet werden können.

[0101] Außerdem kann gemäß Ausführungsbeispielen auf eine galvanische Abscheidung verzichtet werden. Somit können Ausführungsbeispiele, wie zuvor erläutert, insbesondere Partikel aus Wolfram aufweisen.

[0102] Die erfindungsgemäßen Transmissionsgitter können beispielsweise in der Dunkelfeld-Radiografie (z.B. zerstörungsfreie Analyse, klinische Anwendung) und/oder in der Dunkelfeld-Computertomografie (z.B. zerstörungsfreie Analyse, klinische Anwendung) zur Anwendung kommen.

[0103] Alle hierin aufgeführten Aufzählungen der Materialien, Umwelteinflüsse, elektrischen Eigenschaften und optischen Eigenschaften sind als beispielhaft und nicht als abschließend anzusehen.

[0104] Obwohl manche Aspekte im Zusammenhang mit einer Vorrichtung beschrieben wurden, versteht es sich, dass diese Aspekte auch eine Beschreibung des entsprechenden Verfahrens darstellen, sodass ein Block oder ein Bauelement einer Vorrichtung auch als ein entsprechender Verfahrensschritt oder als ein Merkmal eines Verfahrensschrittes zu verstehen ist. Analog dazu stellen Aspekte, die im Zusammenhang mit einem oder als ein Verfahrensschritt beschrieben wurden, auch eine Beschreibung eines entsprechenden Blocks oder Details oder Merkmals einer entsprechenden Vorrichtung dar.

[0105] Die oben beschriebenen Ausführungsbeispiele stellen lediglich eine Veranschaulichung der Prinzipien der vorliegenden Erfindung dar. Es versteht sich, dass Modifikationen und Variationen der hierin beschriebenen Anordnungen und Einzelheiten anderen Fachleuten einleuchten werden. Deshalb ist beabsichtigt, dass die Erfindung lediglich durch den Schutzzumfang der nachstehenden Patentansprüche und nicht durch die spezifischen Einzelheiten, die anhand der Beschreibung und der Erläuterung der Ausführungsbeispiele hierin präsentiert wurden, beschränkt sei.

[0106] Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele gemäß der vorliegenden Erfindung nochmals zusammengefasst:

Ein erstes Ausführungsbeispiel umfasst ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters (100, 300a,b, 400a,b) für Röntgenstrahlung,

wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist: Bereitstellen eines Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) und Erzeugen einer Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b) mittels Strukturieren einer Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten (112, 212, 612) in einer ersten Hauptseite des Substrats, wobei zwischen den Kavitäten jeweils einzelne Stege (114, 514, 614) aus Substratmaterial bestehen bleiben; Verfüllen der Kavitäten mit Partikeln (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in Form von loseem, trockenem Pulver; wobei das Substrat eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweist als die in den Kavitäten befindlichen Partikel.

[0107] Gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel ferner auf: zumindest teilweises Verfestigen der innerhalb der Kavitäten (112, 212, 612) befindlichen Partikel, unter Anwendung eines Beschichtungsprozesses, um zumindest einen Teil der Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in Form einer Vielzahl von verfestigten porösen Körpern (632 d,e) mit, im Vergleich zum Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710), höherer Röntgenstrahlungsabsorption bereitzustellen.

[0108] Gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel werden bei dem Verfahren gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel die in den einzelnen Kavitäten (112, 212, 612) befindlichen Partikel jeweils vollständig mittels des Beschichtungsprozesses zu porösen Körpern (632 d,e) verfestigt.

[0109] Gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel wird bei dem Verfahren gemäß dem zweiten oder dem dritten Ausführungsbeispiel der Beschichtungsprozess unter Verwendung eines flüssigen Polymers durchgeführt; und/oder der Beschichtungsprozess weist ein Abscheiden von organischen oder anorganischen Substanzen aus einer Gasphase, z.B. mittels einer chemischen Gasphasenabscheidung oder z.B. mittels einer Atomlagenabscheidung, auf.

[0110] Gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß einem der vorigen Ausführungsbeispiele ferner auf: Aufbringen einer Deckschicht (340a, 640, 740) auf die erste Hauptseite des Substrats, um die in den Kavitäten (112, 212, 612) befindlichen Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) darin einzuschließen.

[0111] Gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel weist bei dem Verfahren gemäß dem fünften Ausführungsbeispiel das Aufbringen der Deckschicht (340a, 640, 740) mindestens einen der folgenden Schritte auf:

- Aufbringen einer mechanisch stabilen Folie, z.B. einer Polymerfolie oder einer Metallfolie,
- Aufbringen einer Polymerschicht, und/oder
- Aufbringen von aus der Gasphase abgeschiedenen organischen oder anorganischen Substanzen, z.B. mittels chemischer und/oder physikalischer Gasphasenabscheidung oder z.B. mittels Atomlagenabscheidung.

[0112] Gemäß einem siebten Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß einem der vorigen Ausführungsbeispiele ferner auf: Rückdünnen einer, der ersten Hauptseite des Substrats gegenüberliegenden, zweiten Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710).

[0113] Gemäß einem achten Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß einem der vorigen Ausführungsbeispiele ferner auf: zumindest teilweises Entfernen von einem oder mehreren der verbliebenen Stege (114, 514, 614) aus Substratmaterial.

[0114] Gemäß einem neunten Ausführungsbeispiel werden beim dem Verfahren gemäß dem achten Ausführungsbeispiel die Stege (114, 514, 614) ausgehend von der ersten Hauptseite zumindest teilweise entfernt, und/oder die Stege werden ausgehend von einer, der ersten Hauptseite gegenüberliegenden, zweiten Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) zumindest teilweise entfernt.

[0115] Gemäß einem zehnten Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß dem achten oder neunten Ausführungsbeispiel ferner auf: zumindest teilweises Befüllen der Bereiche in denen die Stege (114, 514, 614), oder Teile der Stege, aus Substratmaterial entfernt wurden mit einem Füllstoff (750); wobei der Füllstoff eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweist als die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730).

[0116] Gemäß einem elften Ausführungsbeispiel weist das Verfahren gemäß einem der vorigen Ausführungsbeispiele ferner auf: Aufbringen einer Opferschicht auf die erste Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710), vor dem Erzeugen der Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b); wobei das Strukturieren der Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten (112, 212, 612) in der ersten Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) ein Strukturieren der Opferschicht umfasst, sodass die jeweils zwischen den Kavitäten (112, 212, 612) verbleibenden einzelnen Stege (114, 514, 614) von der Opferschicht bedeckt bleiben; und wobei das Verfahren ferner ein Entfernen der Opferschicht nach dem Verfüllen der Kavitäten (112, 212, 612) mit den Partikeln (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) aufweist.

[0117] Ein zwölftes Ausführungsbeispiel umfasst ein mikrostrukturiertes Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) für Röntgenstrahlung, wobei das Transmissionsgitter die folgenden Merkmale aufweist: ein Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) mit einer Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b), wobei die Gitterstruktur mehrere abwechselnd angeordnete erste und zweite Gitterabschnitte aufweist; wobei die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b, 422a,b) eine Vielzahl von Partikeln (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) aufweisen, die in Form von losem, trockenem Pulver und/oder in Form von mittels einer Beschichtung verfestigten Partikeln vorliegen; und wobei die ersten Gitterabschnitte eine höhere Absorption für Röntgenstrahlung aufweisen als die zweiten Gitterabschnitte, um so das mikrostrukturierte Transmissionsgitter für die Röntgenstrahlung zu bilden.

[0118] Gemäß einem dreizehnten Ausführungsbeispiel weist bei dem Transmissionsgitter gemäß dem zwölften Ausführungsbeispiel das Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) eine Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten (112, 212, 612) auf; und die jeweiligen Kavitäten bilden die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b, 422a,b).

[0119] Gemäß einem vierzehnten Ausführungsbeispiel weist bei dem Transmissionsgitter gemäß dem dreizehnten Ausführungsbeispiel eine jeweilige Kavität (112, 212, 612) ein Aspektverhältnis, bezüglich Breite zu Tiefe, von zumindest 1:9 oder von zumindest 1:5 auf.

[0120] Gemäß einem fünfzehnten Ausführungsbeispiel liegen bei dem Transmissionsgitter gemäß dem dreizehnten oder vierzehnten Ausführungsbeispiel die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) sowohl in Form von losem, trockenem Pulver, als auch in Form von mittels einer Beschichtung zu porösen Körpern (632 d,e) verfestigten Partikeln vor; und das lose, trockene Pulver ist jeweils zwischen den verfestigten Partikeln und dem Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) in den Kavitäten (112, 212, 612) eingeschlossen.

[0121] Gemäß einem sechzehnten Ausführungsbeispiel liegen bei dem Transmissionsgitter gemäß dem zwölften, dreizehnten oder vierzehnten Ausführungsbeispiel die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in Form von mittels einer Beschichtung vollständig zu porösen Körpern (632 d,e) verfestigten Partikeln vor, wobei die porösen Körper jeweils die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b, 422a,b) bilden.

[0122] Gemäß einem siebzehnten Ausführungsbeispiel weisen bei dem Transmissionsgitter gemäß dem fünfzehnten oder sechzehnten Ausführungsbeispiel die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b, 422a,b) eine fehlerstellenfreie Verteilung von Partikeln (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) auf, wobei Fehlerstellen Hohlräume sind, die um ein Mehrfaches größer sind, als eine mittlere Porengröße der porösen Körper (632 d,e).

[0123] Gemäß einem achtzehnten Ausführungsbeispiel weisen bei dem Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis siebzehnten Ausführungsbeispiels die zweiten Gitterabschnitte Substratmaterial und/oder ein vom Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) unterschiedliches Material auf, wobei das vom Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) unterschiedliche Material in Form eines Füllstoffs (750) mit einer, im Vergleich zu den ersten Gitterabschnitten (122, 322a,b, 422a,b), geringeren Röntgenabsorption ausgestaltet ist.

[0124] Gemäß einem neunzehnten Ausführungsbeispiel weist das Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis achtzehnten Ausführungsbeispiels ferner auf: eine auf der Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b) angeordnete Deckschicht (340a, 640, 740), um die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in den ersten Gitterabschnitten (122, 322a,b, 422a,b) einzuschließen.

[0125] Gemäß einem zwanzigsten Ausführungsbeispiel beträgt bei dem Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis neunzehnten Ausführungsbeispiels eine

Gitterperiode der Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b) weniger als 50 μm .

[0126] Gemäß einem einundzwanzigsten Ausführungsbeispiel weisen bei dem Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis zwanzigsten Ausführungsbeispiels die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b, 422a,b) jeweils eine in Einfallrichtung der Röntgenstrahlung zu bemessende Dicke von zumindest 100 μm auf.

[0127] Gemäß einem zweiundzwanzigsten Ausführungsbeispiel beinhalten bei dem Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis einundzwanzigsten Ausführungsbeispiels die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) Wolfram oder bestehen aus Wolfram.

[0128] Gemäß einem dreiundzwanzigsten Ausführungsbeispiel weist bei dem Transmissionsgitter gemäß einem des zwölften bis zweiundzwanzigsten Ausführungsbeispiels das Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) mindestens eines der folgenden Materialien auf oder besteht aus mindestens einem dieser Materialien: Silizium, Glas, Saphir, Keramik, oder Polymere.

Referenzen

[0129]

[1] C. Kostmann, T. Lisec, M. Bodduluri, and O. Andersen, "Automated Filling of Dry Micron-Sized Particles into Micro Mold Pattern within Planar Substrates for the Fabrication of Powder-Based 3D Microstructures," *Micromachines*, vol. 12, no. 10, p. 1176, 2021, doi: 10.3390/mi12101176.

[2] T. Lisec, O. Behrmann, and B. Gojdka, "Powder-MEMS-A Generic Microfabrication Technology for Integrated Three-Dimensional Functional Microstructures," *Micromachines*, vol. 13, no. 3, p. 398, 2022, doi:10.3390/mi 13030398.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Transmissionsgitters (100, 300a,b, 400a,b) für Röntgenstrahlung, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

Bereitstellen eines Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) und Erzeugen einer Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b) mittels Strukturieren einer Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten (112, 212, 612) in einer ersten Hauptseite des Substrats, wobei zwischen den Kavitäten jeweils einzelne Stege (114, 514, 614) aus Substratmaterial bestehen bleiben;
Verfüllen der Kavitäten mit Partikeln (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in Form von losem, trockenem Pulver;
wobei das Substrat eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweist als die in den Ka-

vitäten befindlichen Partikel.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, ferner aufweisend: zumindest teilweises Verfestigen der innerhalb der Kavitäten (112, 212, 612) befindlichen Partikel, unter Anwendung eines Beschichtungsprozesses, um zumindest einen Teil der Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in Form einer Vielzahl von verfestigten porösen Körpern (632 d,e) mit, im Vergleich zum Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710), höherer Röntgenstrahlungsabsorption bereitzustellen.
3. Verfahren gemäß Anspruch 2, wobei der Beschichtungsprozess unter Verwendung eines flüssigen Polymers durchgeführt wird; und/oder wobei der Beschichtungsprozess ein Abscheiden von organischen oder anorganischen Substanzen aus einer Gasphase, z.B. mittels einer chemischen Gasphasenabscheidung oder z.B. mittels einer Atomlagenabscheidung, aufweist.
4. Verfahren gemäß einem der vorigen Ansprüche, ferner aufweisend: Rückdünnen einer, der ersten Hauptseite des Substrats gegenüberliegenden, zweiten Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710).
5. Verfahren gemäß einem der vorigen Ansprüche, ferner aufweisend: zumindest teilweises Entfernen von einem oder mehreren der verbliebenen Stege (114, 514, 614) aus Substratmaterial, und zumindest teilweises Befüllen der Bereiche in denen die Stege (114, 514, 614), oder Teile der Stege, aus Substratmaterial entfernt wurden mit einem Füllstoff (750); wobei der Füllstoff eine geringere Absorption für Röntgenstrahlung aufweist als die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730).
6. Verfahren gemäß einem der vorigen Ansprüche, ferner aufweisend: Aufbringen einer Opferschicht auf die erste Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710), vor dem Erzeugen der Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b); wobei das Strukturieren der Vielzahl periodisch angeordneter Kavitäten (112, 212, 612) in der ersten Hauptseite des Substrats (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) ein Strukturieren der Opferschicht umfasst, sodass die jeweils zwischen den Kavitäten (112, 212, 612) verbleibenden einzelnen Stege (114, 514, 614) von der

- Opferschicht bedeckt bleiben; und
wobei das Verfahren ferner ein Entfernen der
Opferschicht nach dem Verfüllen der Kavitäten
(112, 212, 612) mit den Partikeln (130, 230,
330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) aufweist.
7. Mikrostrukturiertes Transmissionsgitter (100,
300a,b, 400a,b) für Röntgenstrahlung, wobei das
Transmissionsgitter die folgenden Merkmale auf-
weist:
- ein Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610,
710) mit einer Gitterstruktur (120, 320a,b,
420a,b), wobei die Gitterstruktur mehrere ab-
wechselnd angeordnete erste und zweite Gitter-
abschnitte aufweist;
wobei die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b,
422a,b) eine Vielzahl von Partikeln (130, 230,
330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) aufweisen, die
in Form von losem, trockenem Pulver und/oder
in Form von mittels einer Beschichtung verfestig-
ten Partikeln vorliegen; und
wobei die ersten Gitterabschnitte eine höhere
Absorption für Röntgenstrahlung aufweisen als
die zweiten Gitterabschnitte, um so das mikro-
strukturierte Transmissionsgitter für die Rönt-
genstrahlung zu bilden.
8. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
Anspruch 7,
- wobei das Substrat (110, 210, 310a,b, 410a,b,
610, 710) eine Vielzahl periodisch angeordneter
Kavitäten (112, 212, 612) aufweist; und
wobei die jeweiligen Kavitäten die ersten Gitter-
abschnitte (122, 322a,b, 422a,b) bilden.
9. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
Anspruch 8,
- wobei die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b,
530, 630, 730) sowohl in Form von losem, tro-
ckenen Pulver, als auch in Form von mittels ei-
ner Beschichtung zu porösen Körpern (632 d,e)
verfestigten Partikeln vorliegen; und
wobei das lose, trockene Pulver jeweils zwi-
schen den verfestigten Partikeln und dem Sub-
strat (110, 210, 310a,b, 410a,b, 610, 710) in den
Kavitäten (112, 212, 612) eingeschlossen ist.
10. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 7 bis 8,
wobei die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530,
630, 730) in Form von mittels einer Beschichtung
vollständig zu porösen Körpern (632 d,e) verfestig-
ten Partikeln vorliegen, wobei die porösen Körper
jeweils die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b,
422a,b) bilden.
11. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 9 oder 10,
wobei die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b,
422a,b) eine fehlerstellenfreie Verteilung von Partikeln
(130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) aufweisen,
wobei Fehlerstellen Hohlräume sind, die um ein Mehr-
faches größer sind, als eine mittlere Porengröße der
porösen Körper (632 d,e).
12. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 7 bis 11,
wobei die zweiten Gitterabschnitte Substratmaterial
und/oder ein vom Substrat (110, 210, 310a,b,
410a,b, 610, 710) unterschiedliches Material aufwei-
sen, wobei das vom Substrat (110, 210, 310a,b,
410a,b, 610, 710) unterschiedliche Material in Form
eines Füllstoffs (750) mit einer, im Vergleich zu den
ersten Gitterabschnitten (122, 322a,b, 422a,b), ge-
ringeren Röntgenabsorption ausgestaltet ist.
13. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 7 bis 12, ferner umfassend:
eine auf der Gitterstruktur (120, 320a,b, 420a,b) an-
geordnete Deckschicht (340a, 640, 740), um die Par-
tikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530, 630, 730) in den
ersten Gitterabschnitten (122, 322a,b, 422a,b) ein-
zuschließen.
14. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 7 bis 13,
- wobei eine Gitterperiode der Gitterstruktur (120,
320a,b, 420a,b) weniger als 50 μm beträgt;
und/oder
wobei die ersten Gitterabschnitte (122, 322a,b,
422a,b) jeweils eine in Einfallrichtung der Rönt-
genstrahlung zu bemessende Dicke von zumin-
dest 100 μm aufweisen.
15. Transmissionsgitter (100, 300a,b, 400a,b) gemäß
einem der Ansprüche 7 bis 14,
wobei die Partikel (130, 230, 330a,b, 430a,b, 530,
630, 730) Wolfram beinhalten oder aus Wolfram be-
stehen.

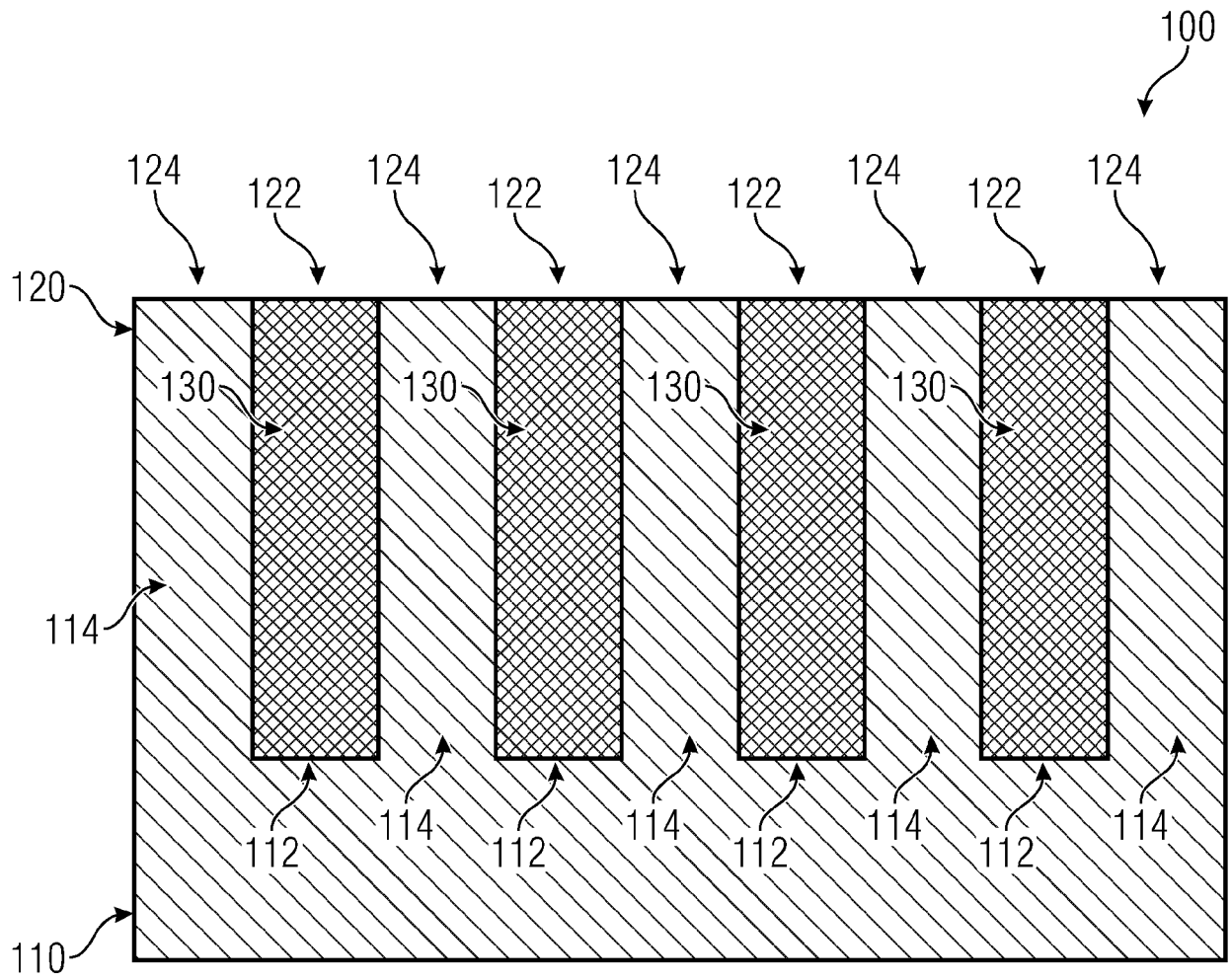


Fig. 1

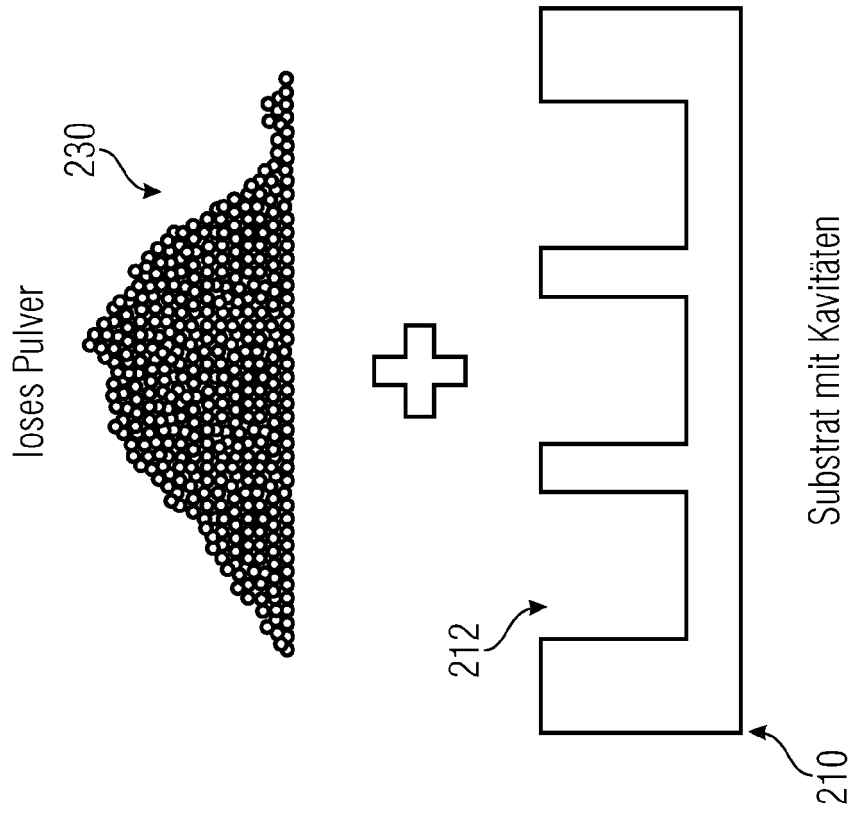


Fig. 2a

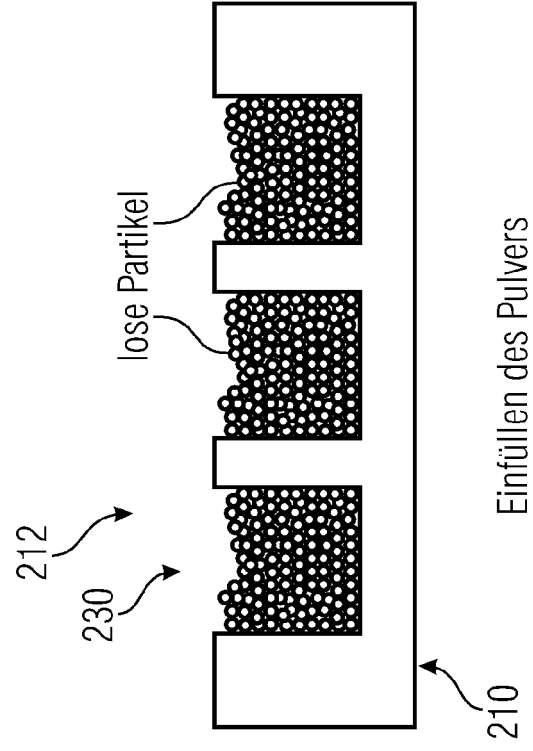


Fig. 2b

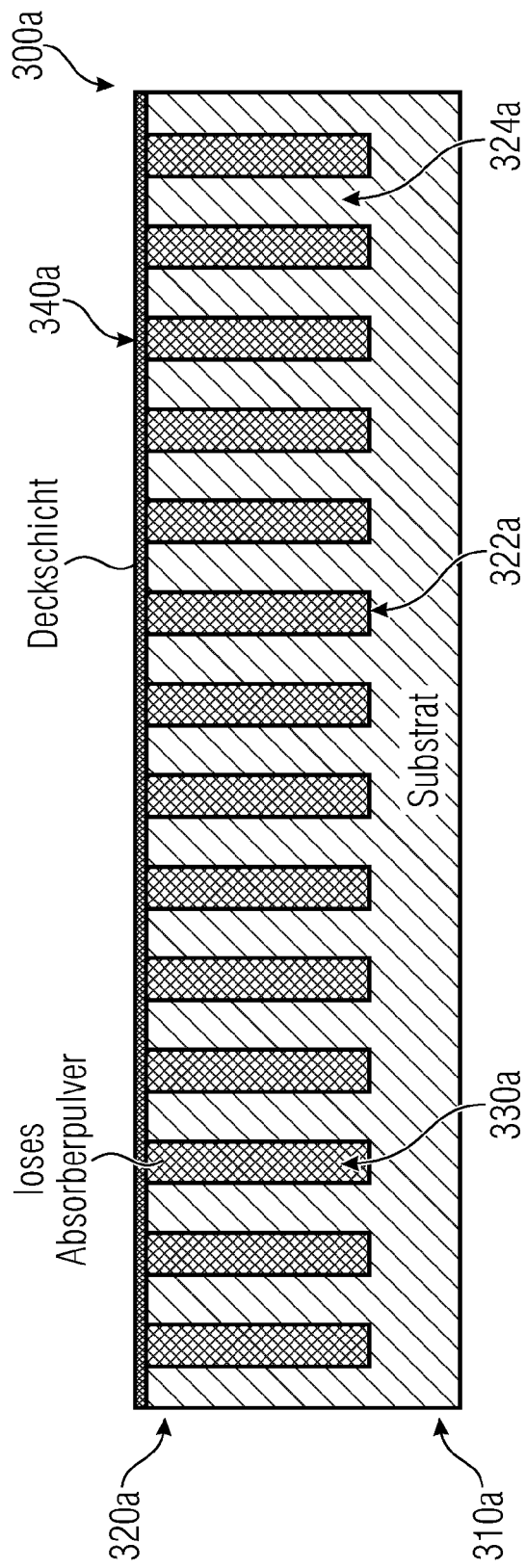


Fig. 3a

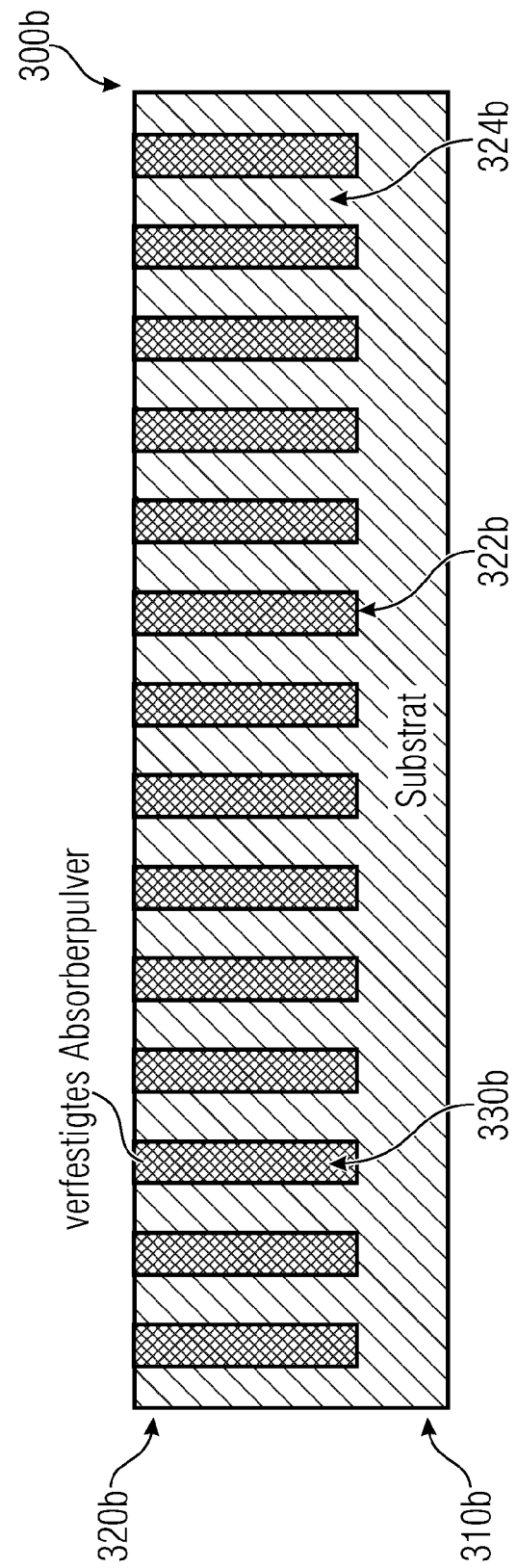


Fig. 3b

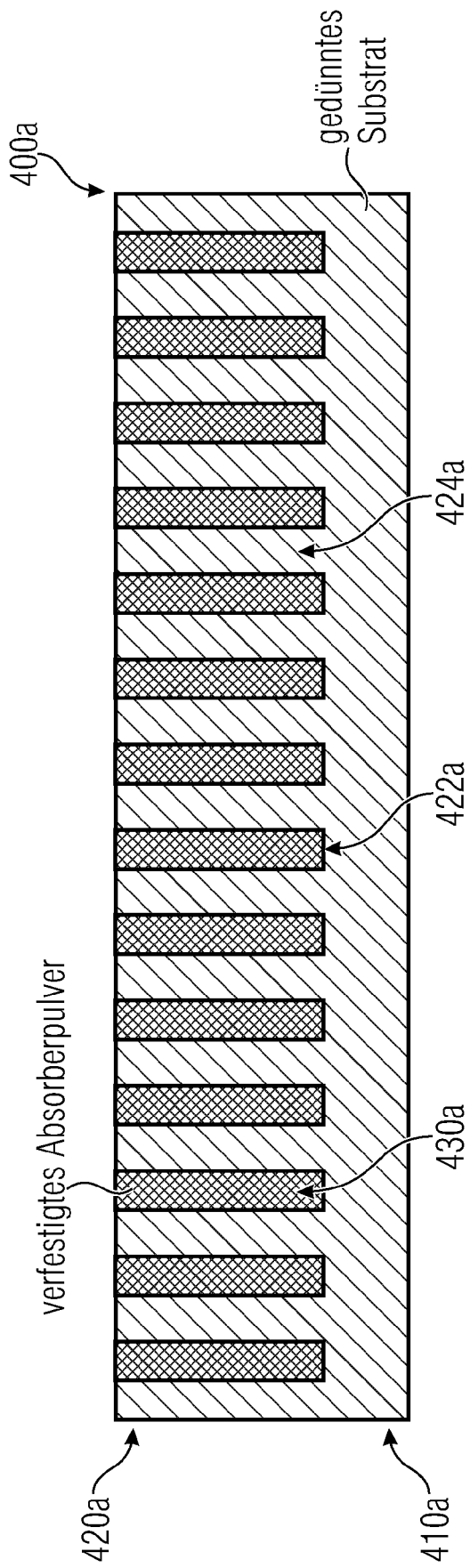


Fig. 4a

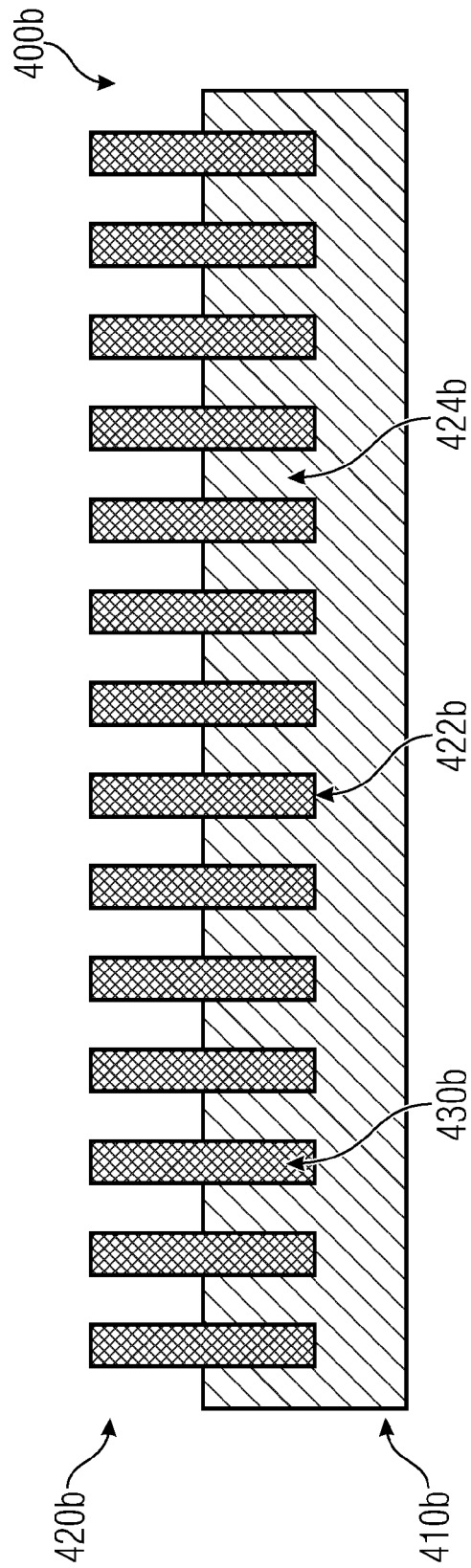


Fig. 4b

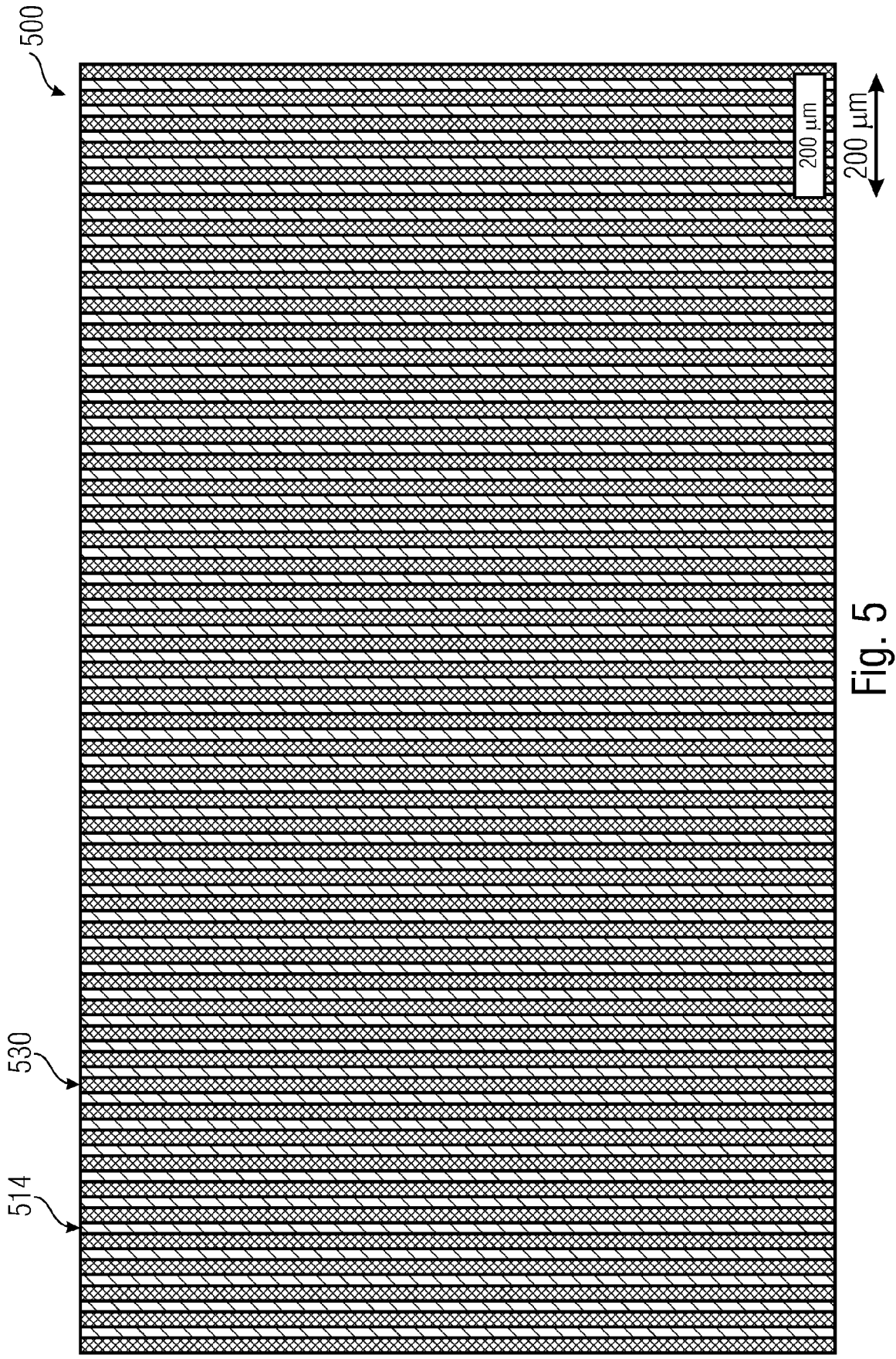


Fig. 5

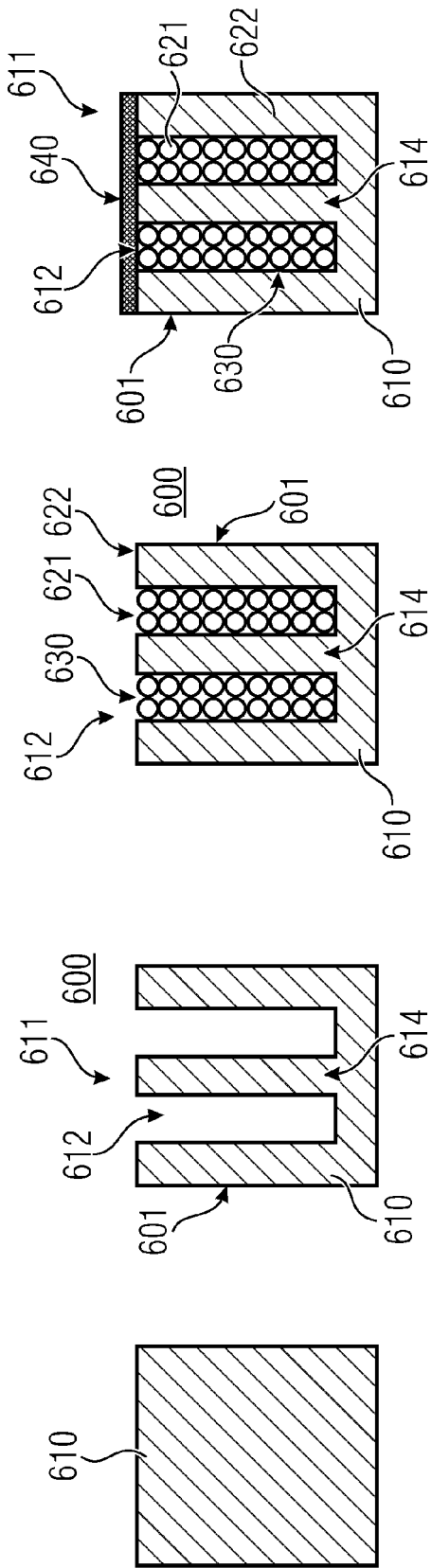


Fig. 6d

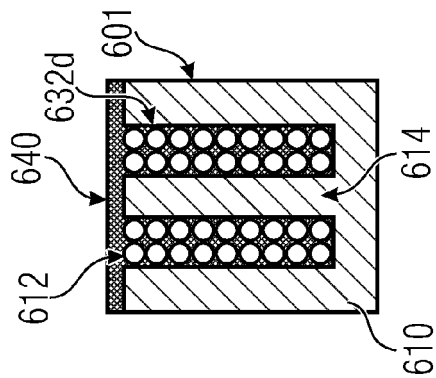
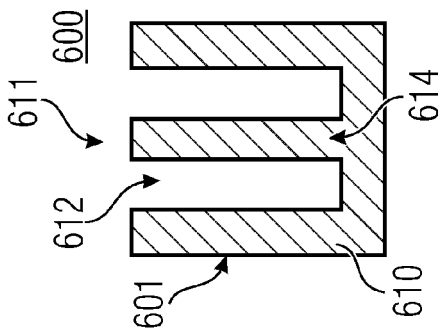
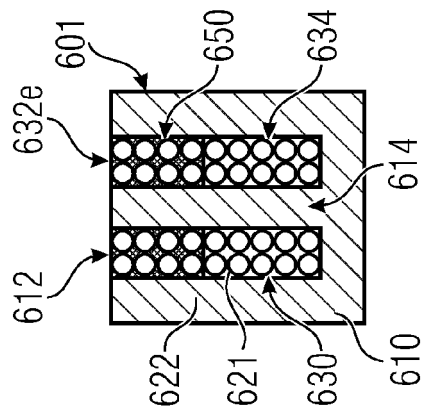
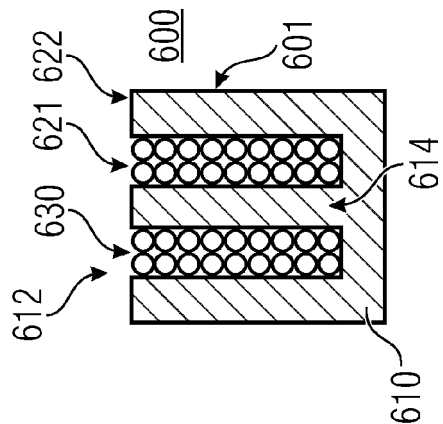
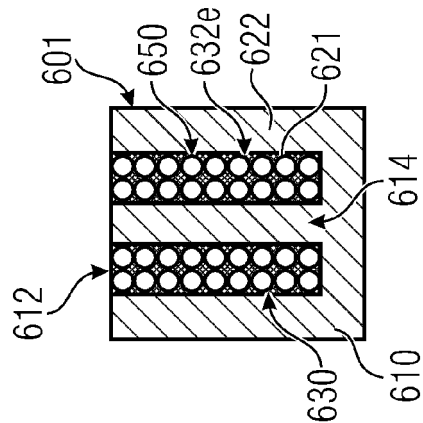


Fig. 6a

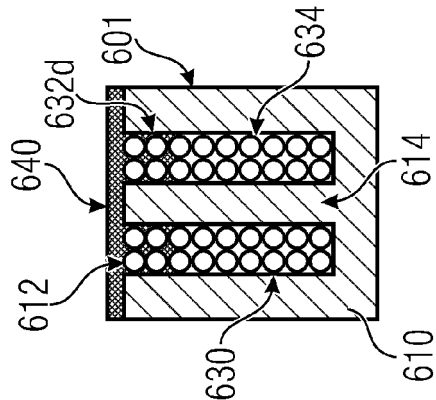


Fig. 6h

Fig. 6g

Fig. 6f

Fig. 6e

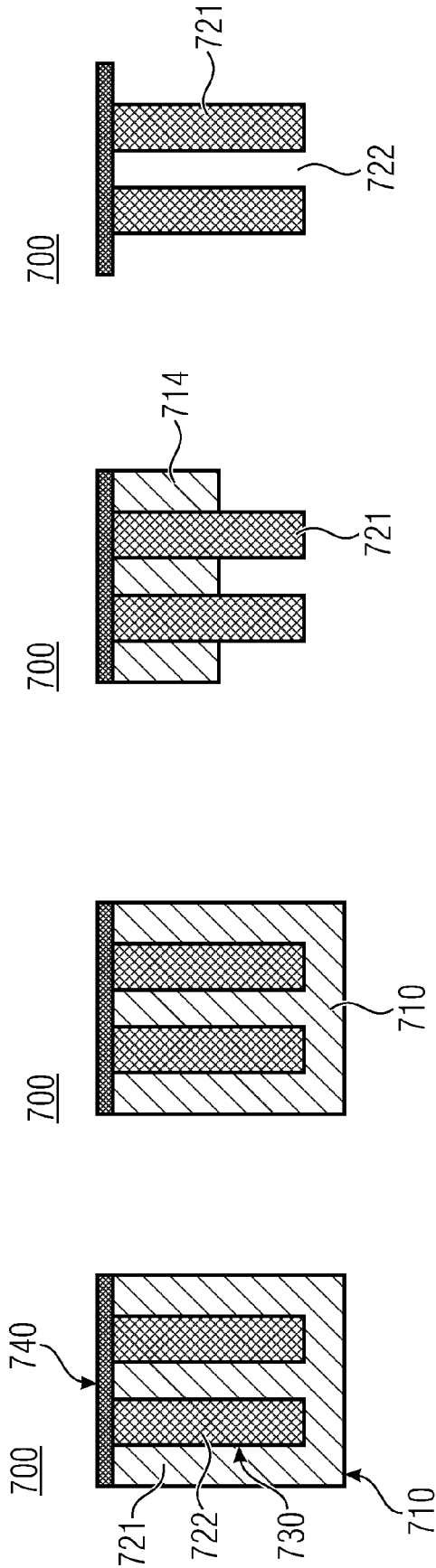
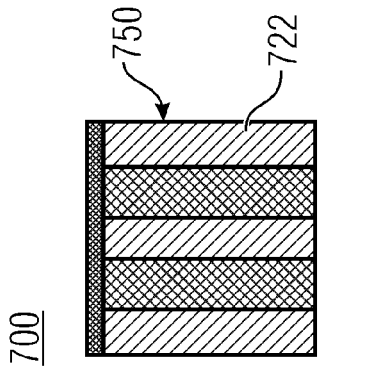
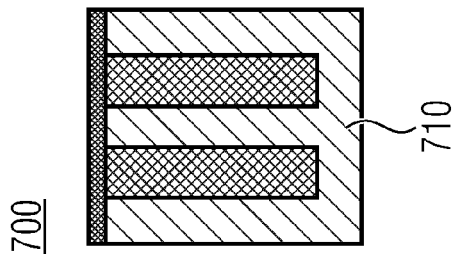
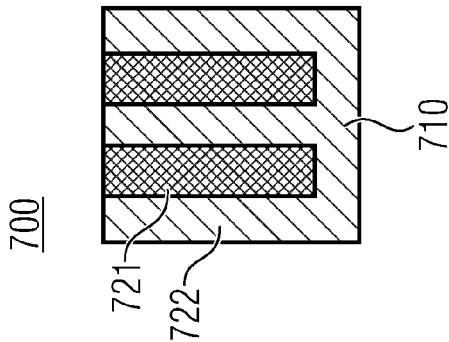
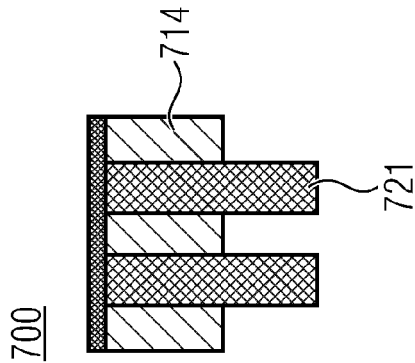
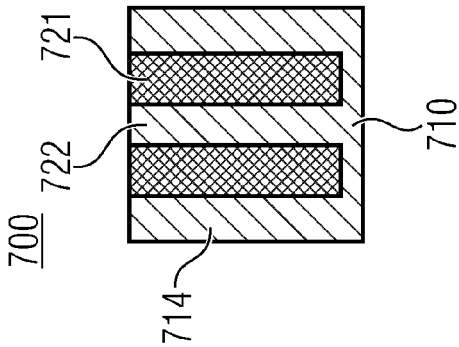


Fig. 7d



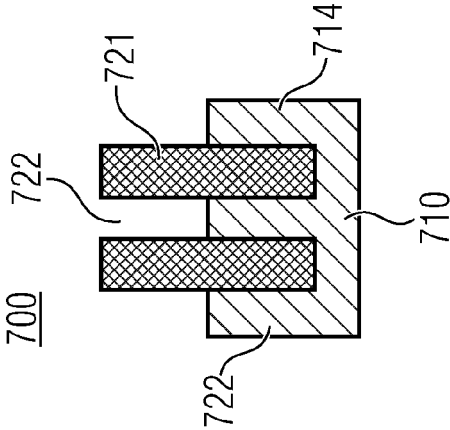


Fig. 7i

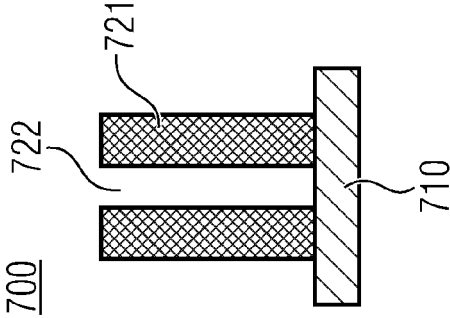


Fig. 7j

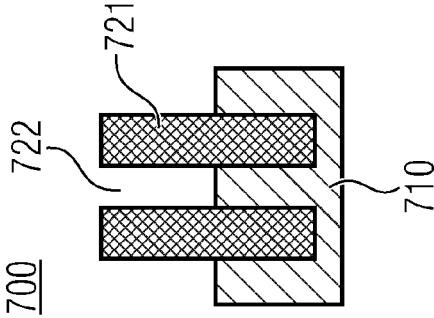


Fig. 7k

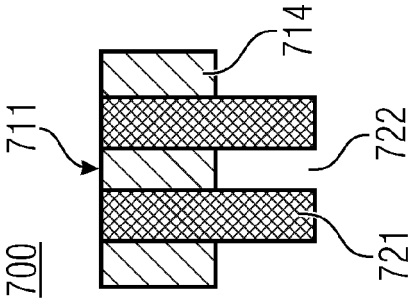


Fig. 7l

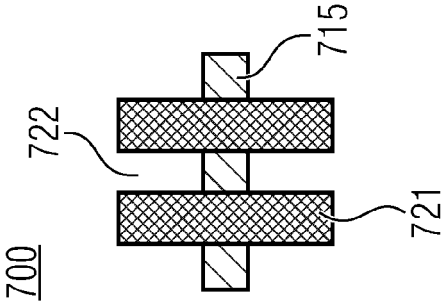


Fig. 7m

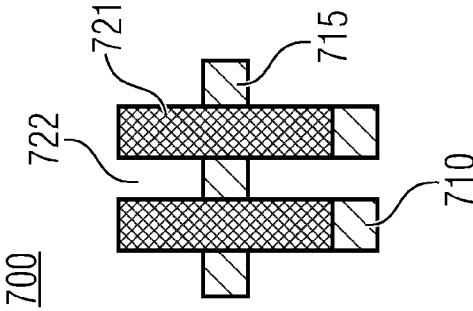


Fig. 7n

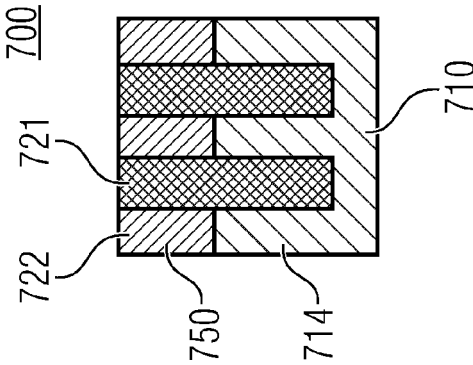


Fig. 7o

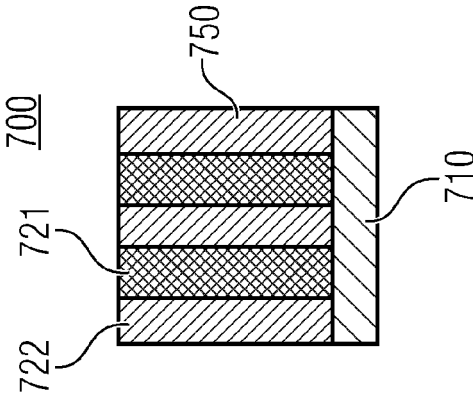


Fig. 7p

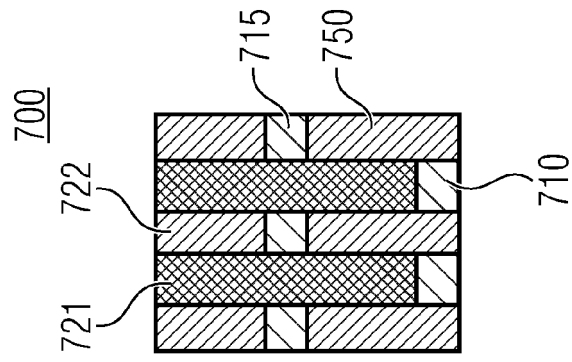


Fig. 7t

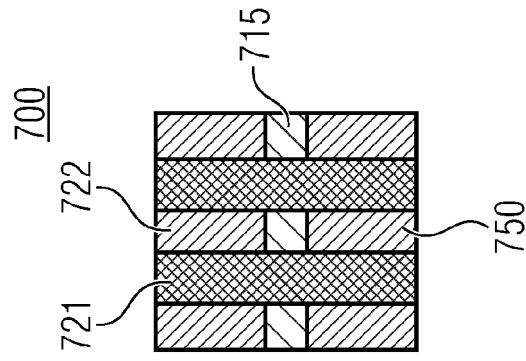


Fig. 7s

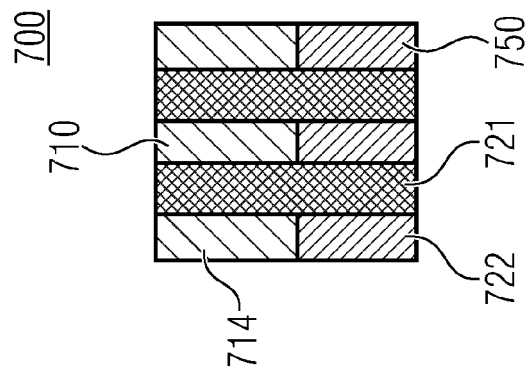


Fig. 7r

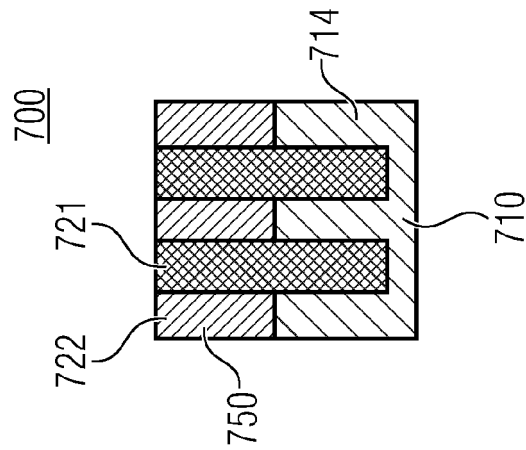


Fig. 7q

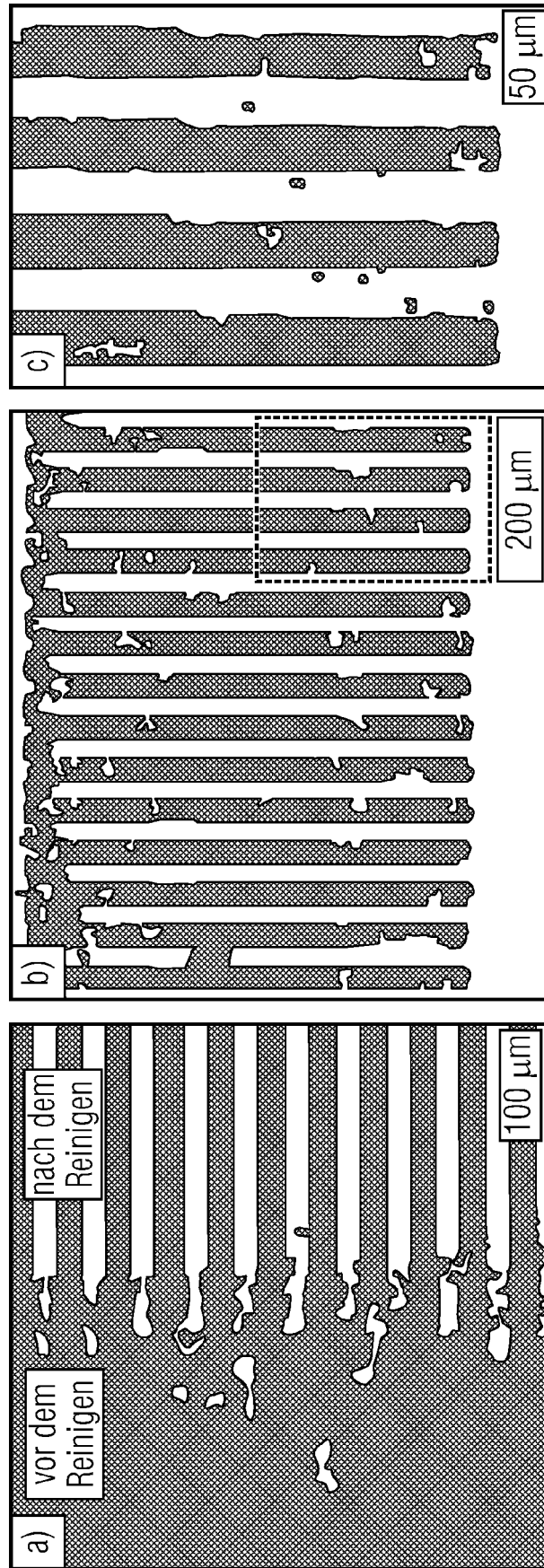


Fig. 8a

Fig. 8b

Fig. 8c



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 24 18 1732

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	DE 10 2016 215616 B4 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 20. Februar 2020 (2020-02-20)	1-3,7-9, 12-14	INV. G21K1/02
A	* Absätze [0008], [0017], [0057] * -----	5	
X	EP 3 844 536 B1 (KONINKLIJKE PHILIPS NV [NL]) 23. Februar 2022 (2022-02-23) * Absätze [0001], [0012], [0031] * -----	1,7,8, 10-12	
X	US 2017/040076 A1 (YOKOYAMA MITSURU [JP]) 9. Februar 2017 (2017-02-09) * Absätze [0003], [0011], [0016] * -----	1,4,6-8, 12	
X	DE 10 2010 061481 A1 (MIRCOWORKS GMBH [DE]) 28. Juni 2012 (2012-06-28) * Absätze [0001], [0043] * -----	1,7,15	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) G21K
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 24. Oktober 2024	Prüfer Oestreich, Sebastian
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 24 18 1732

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

24-10-2024

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	DE 102016215616 B4	20-02-2020	CN 107765195 A	06-03-2018
			DE 102016215616 A1	22-02-2018
			US 2018053523 A1	22-02-2018
15	-----		-----	
	EP 3844536 B1	23-02-2022	CN 112513687 A	16-03-2021
			EP 3654075 A1	20-05-2020
			EP 3844536 A1	07-07-2021
			JP 7096434 B2	05-07-2022
20			JP 2022507133 A	18-01-2022
			RU 2754640 C1	06-09-2021
			US 2021313086 A1	07-10-2021
			WO 2020099280 A1	22-05-2020
	-----		-----	
25	US 2017040076 A1	09-02-2017	EP 3127861 A1	08-02-2017
			JP 6593017 B2	23-10-2019
			JP 2017032476 A	09-02-2017
			US 2017040076 A1	09-02-2017
	-----		-----	
30	DE 102010061481 A1	28-06-2012	KEINE	
	-----		-----	
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **C. KOSTMANN ; T. LISEC ; M. BODDULURI ; O. ANDERSEN.** Automated Filling of Dry Micron-Sized Particles into Micro Mold Pattern within Planar Substrates for the Fabrication of Powder-Based 3D Microstructures. *Micromachines*, 2021, vol. 12 (10), 1176 **[0129]**
- **T. LISEC ; O. BEHRMANN ; B. GOJDKA.** Powder-MEMS-A Generic Microfabrication Technology for Integrated Three-Dimensional Functional Microstructures. *Micromachines*, 2022, vol. 13 (3), 398 **[0129]**