

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
11. Januar 2018 (11.01.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/007558 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01J 5/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/067023

(22) Internationales Anmeldedatum:
06. Juli 2017 (06.07.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 212 423.4
07. Juli 2016 (07.07.2016) DE

(71) Anmelder: FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E.V. [DE/DE]; Hansastraße 27c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder: WEILER, Dirk; Ringstrasse 174b, 44627 Herne
(DE). MUCKENSTURM, Kai-Marcel; Dennewitzstr. 18,
47138 Duisburg (DE). HOCHSCHULZ, Frank; Nahkamp
6e, 48683 Ahaus (DE).

(74) Anwalt: SCHENK, Markus et al.; Schoppe, Zimmer-
mann, Stöckeler, Zinkler, Schenk & Partner mbB, Radlko-
ferstr. 2, 81373 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,

(54) Title: RADIATION DETECTOR AND PRODUCTION THEREOF

(54) Bezeichnung: STRAHLUNGSDETEKTOR UND HERSTELLUNG

(57) Abstract: A radiation detector 1 comprises a substrate 2 and a membrane 3, and at least one spacer 4, for holding the membrane 3 at a distance from the substrate 2, for electrically contacting the membrane 3, and for thermally insulating the membrane 3 relative to the substrate 2. The at least one spacer 4 is subdivided into a first portion 4a and a second portion 4b in a direction between the substrate 2 and the membrane 3, the length of each of which bridges less than a distance between the substrate 2 and the membrane 3, wherein the first and second portions 4a, 4b are laterally offset relative to each other and interconnected by a lateral element 5, such that the first and second portions 4a, 4b are electrically connected in series by the lateral element 5, and wherein the lateral element 5 contributes to a thermal resistance of the at least one spacer 4 less than, or to the same extent as, a sum of the thermal resistances of the first and second portions 4a, 4b. Alternatively, the at least one spacer 14 can have an electrically and thermally conductive layer 8, which in a sectional area perpendicular to the substrate 2 extends in a loop through the at least one spacer 14, such that an electrical path through the at least one spacer 14, by way of which the membrane 3 is contacted, is longer than a distance between the substrate 2 and the membrane 3. Another possible alternative is for the radiation detector 1 to comprise a substrate 2 with a cavity and a membrane 3, wherein the cavity extends in the substrate 2 in a direction away from the membrane 3, wherein at least one spacer 4, 14 is designed for holding the membrane 3 at a distance from the substrate 2, for electrically contacting the membrane 3, and for thermally insulating the membrane 3 relative to the substrate 2, said at least one spacer 4, 14 extending into the cavity. Alternatively or additionally, the spacer 4, 14, 14n has a side wall roughening obtained by scallops, in order to reduce phonon transport by surface scattering effects and by the resulting path extension. The invention further relates to methods for producing radiation detectors 1 of this type.

(57) Zusammenfassung: Ein Strahlungsdetektor 1 beinhaltet ein Substrat 2 und eine Membran 3 und zumindest einen Abstandshalter 4 zur Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur elektrischen Kontaktierung der Membran 3 und zur thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des Substrats 2. Dabei ist der zumindest ein Abstandshalter 4 in einen ersten Abschnitt 4a und einen zweiten Abschnitt 4b in einer Richtung zwischen Substrat 2 und Membran 3 gegliedert, deren Länge jeweils weniger als einen Abstand zwischen Substrat 2 und Membran 3 überbrückt, wobei der erste und zweite Abschnitt 4a, 4b lateral zueinander versetzt und über ein lateral verlaufendes Element 5 verbunden sind, so dass der erste und der zweite Abschnitt 4a, 4b über das lateral verlaufende Element 5 elektrisch in Reihe geschaltet sind, und wobei das lateral verlaufende Element 5 weniger oder gleich zu einem thermischen Widerstand des zumindest einen Abstandshalters 4 beiträgt bei als eine Summe der thermischen Widerstände des ersten und zweiten Abschnitts 4a, 4b. Alternativ kann der zumindest eine Abstandshalter 14 eine elektrische und thermisch leitfähige Schicht 8 aufweisen, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat 2 schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter 14 erstreckt, so dass ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter 14 über den die Membran 3 kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat 2 und Membran 3 ist. Auch kann alternativ der Strahlungsdetektor 1 ein Substrat 2 mit einer Vertiefung und eine Membran 3 beinhalten, wobei sich die Vertiefung in dem Substrat 2 in einer Richtung weg von der Membran 3 erstreckt, wobei zumindest ein Abstandshalter 4, 14 zur Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur elektrischen Kontaktierung der Membran 3 und zur thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des Substrats 2 ausgebildet ist wobei sich der zumindest eine Abstandshalter 4, 14 in die Vertiefung erstreckt. Alternativ oder zusätzlich weist der Abstandshalter 4, 14, 14n eine Seitenwandrauigkeit auf, welche

WO 2018/007558 A2

SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

durch Scallop erreicht wird, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte sowie durch die resultierende Wegverlängerung zu reduzieren. Zusätzlich werden Verfahren zur Herstellung solcher Strahlungsdetektoren 1 vorgestellt.

Strahlungsdetektor und Herstellung

Beschreibung

- 5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen Strahlungsdetektor und dessen Herstellung, wie z.B. einen Bolometer und dessen Herstellung, und insbesondere auf Realisierungsformen von Nanotube-Mikrobolometern.

- 10 Ungekühlte Widerstandsmikrobolometer-Arrays, im Weiteren auch als Mikrobolometer bezeichnet, können zur Detektion von ferninfraroter Strahlung ($7,5\ \mu\text{m} - 14,5\ \mu\text{m}$) verwendet werden. Diese Mikrobolometer sind eine mögliche Realisierungsform von sogenannten infrared focal plane arrays (IRFPA).

- 15 Bekannte Mikrobolometer beinhalten eine Membran, welche von zwei Metallkontakten mittels dünner Stege über dem Substrat im Vakuum aufgehängt und somit thermisch isoliert ist. Grundlegend besteht die Membran aus einer Absorber- sowie einer Sensorschicht. Um eine möglichst geringe Reflexion der einfallenden infraroten Strahlung zu gewährleisten, ist der Schichtwiderstand der Absorberschicht an den Wellenwiderstand von Luft angepasst (ca. $377\ \text{Ohm/sq}$). Weiterhin befindet sich unterhalb der
- 20 Membran eine Metallschicht, welche als Reflektor bezeichnet wird, auf dem Substrat. Licht, insbesondere Infrarotlicht oder Ferninfrarotlicht, welches auf das Bolometer, genauer gesagt den Absorber, einfällt, wird zum Teil durch den Absorber und die Sensorschicht transmittiert. Mittels der Metallschicht bzw. des Reflektors wird das zum Teil transmittierte Licht bzw. die transmittierte Strahlung zurückreflektiert und kann anschließend von der
- 25 oberen Absorberschicht absorbiert werden. Die Kavität zwischen der Absorberschicht und dem (unteren) Reflektor bildet einen optischen (Fabry-Perot-) Resonator. Der Abstand zwischen Absorberschicht und (Fabry-Perot-) Resonator wird vorteilhafter Weise so gewählt, dass der optische Weg (nd) ein ungerades Vielfaches von einem Viertel der zu detektierenden Hauptwellenlänge λ ist, um die Resonatorbedingung zu erfüllen (Gl.1).
- 30 Der optische Weg setzt sich zusammen aus der Summe der Schichtdicken gewichtet mit den Brechungsindizes der Medien innerhalb der Kavität (Gl.2).

$$nd = (2k + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (k = 0, 1, 2 \dots) \quad (\text{Gl.1})$$

$$nd = \sum n_i d_i \quad (\text{Gl.2})$$

Bei einem Körper mit einer Temperatur von z. B. 300 K wäre das Maximum der spektralen Strahldichte bei etwa $\lambda = 10 \mu\text{m}$. Hieraus resultiert ein optischer Weg von $nd = 2,5 \mu\text{m}$ ($k = 0$). Fig. 1 skizziert den prinzipiellen Aufbau eines Mikrobolometers. Dieses umfasst ein Substrat 2 und eine Membran 3, welche durch Metallkontakte 17 im Abstand d vom Substrat 2 beabstandet ist. Die Membran 3 umfasst eine dem Substrat 2 zugewandte Sensorschicht 3b und eine dem Substrat 2 abgewandte Absorberschicht 3c. Die obere Seite des Substrats 2 weist eine Metallisierung 2m auf, welche als Reflektor für einfallendes Licht wirkt.

Aufgrund der Absorption der einfallenden insbesondere infraroten oder ferninfraroten Strahlung erwärmt sich die thermisch isolierte Membran 3, was eine Änderung des elektrischen Widerstandes der Sensorschicht 3b zur Folge hat. Die Temperaturänderung der Membran 3 ist dabei abhängig von der thermischen Isolierung mittels der Stege bzw. Metallkontakte 17 sowie von der Energie der absorbierten Strahlung und ist in der Regel mehrere Größenordnungen kleiner als die Änderung der Strahlertemperatur. Die Widerstandsänderung der Sensorschicht 3b kann dann mit Hilfe einer integrierten Ausleseschaltung (engl.: Read Out Integrated Circuit, abgekürzt ROIC) bestimmt werden.

Ein entscheidender Performanceindikator für Mikrobolometer ist die sogenannte Noise Equivalent Temperature Difference (NETD). Dieser Faktor ist definiert als die Temperaturänderung eines Objektes, die eine Änderung des Messsignales generiert, welches dem Rauschen des Systems entspricht und somit ein Maß für die Empfindlichkeit des Sensors (Gl.3) ist.

$$NETD = \frac{4F^2}{A\varepsilon\pi} \frac{dL}{dT} \frac{\sqrt{u_n^2} g_{th}}{U_{bias} TCR} \quad (\text{Gl.3})$$

25

F ist die Blendenzahl, A die Absorberfläche, ε der Emissionskoeffizient, L die Strahldichte und T die Temperatur des Objektes, $\overline{u_n^2}$ das Quadrat der gesamten Rauschspannung, g_{th} der thermische Leitwert und U_{bias} die Biasspannung.

Aus Gl.3 wird ersichtlich, dass die NETD u. a. maßgeblich von der thermischen Isolierung der Membran bzw. dem entsprechenden thermischen Leitwert g_{th} beeinflusst wird. Im

Allgemeinen ist die Membran thermisch schlecht vom Substrat isoliert, da die Aufhängung durch Metallkontakte geschieht. Der resultierende thermische Leitwert ist in diesem Fall nicht ausreichend klein, um eine gute oder zufriedenstellende Performance zu erzielen (NETD < 100 mK), da die Kontakte über Röhrchen mit dicken Metallbeschichtungen geschehen. Diese Metallbeschichtungen müssen aus Prozess- und Stabilitätsgründen so dick sein bzw. eine minimale Dicke aufweisen und leiten somit die in der Membran entstehende Wärme relativ gut.

In herkömmlichen, in Fig. 2 gezeigten, Mikrobolometern wird eine Verbesserung der thermischen Isolierung bzw. Reduzierung des thermischen Leitwerts durch zusätzliche Verbindungselemente (Stege 4s) zwischen der aufgehängten Membran und den Metallkontakten k realisiert.

Beispielsweise lehrt Weiler (Weiler, Dirk, et al. "Improvements of a digital 25 µm pixel-pitch uncooled amorphous silicon TEC-less VGA IRFPA with massively parallel Sigma-Delta-ADC readout." *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 2011) ein Array bestehend aus derartigen Mikrobolometern. Ein Mikrobolometer enthält dabei einen Absorber, welcher von zwei Stegen gehalten wird, so dass sich der Absorber außer der Kontaktierung durch die Stege im Vakuum befindet.

Der thermische Leitwert der Stege g_{Steg} lässt sich bestimmen durch Gl. 4

$$g_{Steg} = 2 \frac{b_{Steg} d_{Steg}}{l_{Steg}} \sum \lambda_i \quad (Gl.4)$$

wobei λ_i die thermische Leitfähigkeit der einzelnen Stegmaterialien, b_{Steg} und d_{Steg} die Breite und Dicke der einzelnen Stegmaterialien und l_{Steg} die Länge der Stege ist. Der Faktor 2 ergibt sich, weil zwei Stege 4s vorhanden sind. Also sollte, um eine gute thermische Isolierung zu erzielen, die Querschnittsfläche der Stege 4s möglichst klein sein und die Stege 4s aus Materialien bestehen, welche eine geringe thermische Leitfähigkeit besitzen. Bezüglich der Wärmeisolierung ist der Anteil der Metallkontakte 4k meist gegenüber dem der Stege 4s zu vernachlässigen. Weiterhin wird die thermische Isolierung beeinflusst durch die Wärmestrahlung an die Umgebung. Da die Infrarotdetektoren jedoch im Vakuum betrieben werden, ist der Einfluss ebenfalls meist sehr gering, so dass insgesamt die thermische Leitfähigkeit der Stege 4s dominiert.

Die Entwicklung der Mikrobolometer bewegt sich hin zu immer kleineren Pixelgrößen für hochauflösende IRFPAs. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Performance. Aktuell sind Mikrobolometer-Arrays mit 17 μm Pixelpitch üblich. Diese soll jedoch erfindungsgemäß auf ein Pixelpitch von ca. 12 μm reduzierbar sein. Eine Skalierung des Pixelpitch von 17 μm auf 12 μm bedeutet eine Halbierung der Absorberfläche.

Generell hat eine Verkleinerung des Pixelpitch aufgrund der Reduzierung der Absorberfläche einen massiven Einfluss auf die Performance der Mikrobolometer.

- 10 Die effektive Absorberfläche ist aufgrund der benötigten Fläche zur Realisierung der Stege, eingeschränkt. Abhängig vom Design und Aufbau der Stege bzw. Zielwert des thermischen Leitwerts kann die beanspruchte Fläche der Stege unterschiedlich groß sein. Die Absorberfläche hat jedoch gleichermaßen einen Einfluss auf die Performance wie der thermische Leitwert. Wird nun die Pixelfläche um einen gewissen Faktor ver-
- 15 kleinert, könnte theoretisch das gesamte Mikrobolometer dementsprechend skaliert werden, so dass die Verhältnisse der einzelnen Flächen (Stege, Kontakte, Absorberfläche) und Abstände zueinander immer gleich ist. Der Performanceverlust wäre dann u. a. durch den Skalierungsfaktor bestimmt. Diese Skalierung mit einem festen Faktor für alle Komponenten ist jedoch praktisch nicht möglich, da bei einer solchen Skalierung die
- 20 Grenzen der Lithographie erreicht werden. Typischerweise wird für die Herstellung von Mikrobolometer-Arrays eine Stepper-Lithographie mit einer Auflösung von 0,35 μm verwendet. Oftmals werden bereits in aktuellen aber auch in älteren Mikrobolometergenerationen (17 μm , 25 μm , 35 μm) Strukturgrößen am Limit dieser Auflösung verwendet, wie z. B. bei den Stegbreiten und -Abständen. Des Weiteren können auch
- 25 aus Prozess- und Stabilitätsgründen die Kontaktlöcher und oberen Kontaktflächen nicht beliebig klein skaliert werden, so dass auch hier ein Limit existiert. Zusammenfassend nehmen je kleiner die Bolometer sind, die Stegflächen relativ zur Pixelgröße immer mehr Platz ein bei einem festen thermischen Leitwert. Hierdurch wird die effektive Absorberfläche zusätzlich verkleinert und die Performance folglich stark gemindert.

30

- In Li (Li, Chuan, et al., Recent development of ultra small pixel uncooled focal plane arrays at DRS. *Defense and Security Symposium*. International Society for Optics and Photonics, 2007) wird die Absorberschicht über die gesamte Pixelfläche schirmartig aufgespannt. Eine derartige Anordnung wird auch two-layer- oder auch Umbrella-Design
- 35 genannt, da die komplette Außenfläche für den Absorber zur Verfügung steht. Nachteilig ist jedoch, dass sich die Stege und die Sensorschicht weiterhin in einer Ebene befin-

den. Die thermische Isolierung ist demnach limitiert durch die freie, zur Verfügung stehende, Pixelfläche. Weiterhin wird die Resonatorbedingung in dem Bereich der Aufhängung des Absorbers nicht erfüllt, was sich negativ auf die Absorption auswirkt.

- 5 Auch in Niklaus (Niklaus, Frank, Christian Vieider, and Henrik Jakobsen. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review. *Photonics Asia 2007*. International Society for Optics and Photonics, 2007) werden Bolometer diskutiert, wobei eine Ausführungsform ein konventionelles Steg-Design umfasst und eine andere ein Umbrella-Design, welches dem in Li beschriebenen Design ähnelt.

10

In der WO 2016 / 005 505 A2 steht eine große Fläche für den Absorber zur Verfügung. Erfindungsgemäß soll jedoch der thermische Leitwert weiter verringert werden können. Es soll also bei einer Skalierung des Pixelpitches die gewünschte Performance der so realisierten Mikrobolometer erreicht werden.

15

Der Ansatz der WO 2016 / 005 505 A2 basiert auf der Realisierung der thermischen Isolierung und gleichzeitiger elektrischer Kontaktierung von elektromagnetischen Strahlungsdetektoren (speziell Infrarotdetektoren) mit Hilfe von ausreichend langen und dünnbeschichteten Hohlröhrchen, welche auch als Nanotubes bezeichnet werden. Diese sind in Fig. 3 im Querschnitt dargestellt und können mit Technologien und Prozessen aus der Mikrosystemtechnik hergestellt werden. Der thermische Leitwert der Kontakte ist im Vergleich zu den Stegen, aufgrund der dicken Metallbeschichtung bislang sehr groß und trägt daher nicht zur Isolierung bei. Werden die Außenwände der runden Kontakte jedoch hinreichend dünn mit einer geeigneten Metallschicht beschichtet, resultiert daraus ein thermischer Leitwert, welcher vergleichbar mit dem der Stege ist bzw. sogar deutlich kleiner sein kann. Der thermische Leitwert der Kontaktöröhrchen (s. Gl. 5) (hier als Nanotube-Kontakte oder Nanotubes beschrieben) lässt sich analog zu Gl. 4 berechnen, wobei hier Kreisringe die jeweiligen Querschnittsflächen bilden.

25
30

$$g = \frac{2\pi}{l} \sum \lambda_i (r_{i,2}^2 - r_{i,1}^2) \quad (\text{Gl.5})$$

Der Term $r_{i,2} - r_{i,1} = d$ ist äquivalent zur Dicke der einzelnen Materialien/Schichten innerhalb der Kontakte.

Ähnlich zu den Stegen sind die Abstandshalter lang und aus dünnen Materialien, welche eine geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen. Zudem sollte der Grundradius $r_{2,2}$ der Kontakte $4k$ ebenfalls möglichst klein gewählt werden. Anders ausgedrückt sollte der Gesamtdurchmesser D der Kontakte, d.h. $r_{N,2}$, möglichst klein gewählt werden.

5

Wie beschrieben besteht die Membran, welche von den Abstandshaltern getragen wird, aus einem Element, welches seine elektrischen Eigenschaften bei Zuführung von Wärme verändert und einer Absorberschicht. Das temperaturempfindliche Element besteht entweder aus einem elektrischen Widerstand, einer Kapazität, einer Induktivität oder

10

Neben der thermischen Isolierung besteht die zweite Funktion der Abstandshalter darin, dieses Element elektrisch zu kontaktieren. Im Allgemeinen bestehen die Nanotubes aus einer elektrisch leitenden Schicht. Zum Schutz dieser leitenden Schicht beim Ätzprozess der Opferschicht können optional weitere Schutzschichten ebenfalls mit der Atomlagenbeschichtung abgeschieden werden. Diese Schutzschichten müssen elektrisch sowie thermisch isolierend und stabil gegenüber dem Ätzmedium der Opferschicht sein. Die Dicken aller Schichten der Nanotubes liegen in einem Bereich von $0,1 \text{ nm} - 1 \text{ }\mu\text{m}$.

15

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen Strahlungsdetektor zu schaffen sowie ein Herstellungsverfahren, so dass die Herstellbarkeit bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit und hoher thermischer Isolierung gegenüber dem Substrat oder ein besseres Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit der Membranaufhängung bei vergleichbarem Herstellaufwand erzielbar ist, oder dass der eingenommene Raum des Strahlungsdetektors bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit und hoher thermischer Isolierung gegenüber dem Substrat oder umgekehrt ein besseres Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit der Membranaufhängung bei gleichem eingenommenen Raum des Strahlungsdetektors erzielbar ist. Alternativ oder zusätzlich soll der thermische Widerstand der Membranaufhängung vergrößert werden bzw. der thermische Leitwert verringert werden durch Anpassungen in der Mikrostruktur der Membranaufhängung.

25

30

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch einen Strahlungsdetektor gemäß einem der unabhängigen Ansprüche bzw. gemäß einem Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem der unabhängigen Ansprüche .

35

Vorteilhafte Weiterbildungen befinden sich in den Unteransprüchen.

Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird die Herstellbarkeit der Abstandshalter verbessert, indem der Abstandshalter in zwei Abschnitte untergliedert wird. Dadurch kann der Abstandshalter in seiner maximalen Länge zwischen Membran und Substrat verlängert werden. Üblicherweise ist die maximale Länge von Nanotubes - als mögliche Ausführungsform von Abstandshaltern - aus prozesstechnischen Gründen begrenzt, da z. B. nur zuverlässig in eine begrenzte Tiefe, d. h. eine begrenzte Länge, in Öffnungen abgeschieden werden kann, um beispielsweise Abstandshalterwände zu definieren. Dadurch, dass ein Abstandshalter in zwei Abschnitte untergliedert wird, kann sowohl der erste als auch der zweite Abschnitt in der jeweiligen prozesstechnischen maximal realisierbaren Länge erzeugt werden. Diese sind noch zusätzlich über ein lateral verlaufendes Element verbunden. Letzteres könnte exemplarisch dazu verwendet werden, den thermischen Widerstand sogar noch weiter zu vergrößern.

In einer vorteilhaften Weiterbildung dieses Ausführungsbeispiels ist ein Querschnitt eines elektrisch leitfähigen Materials des ersten und zweiten Abschnitts kleiner oder gleich als $7 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $3 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $0,8 \mu\text{m}^2$.

Vorteilhafterweise wird der Abstand zwischen dem lateral verlaufenden Element und der Membran nach der Resonatorbedingung gemäß Gl. 1 gewählt, wodurch das Element als Rückseitenspiegel dienen kann, indem es auch lateral zwischen Membran und Substrat angeordnet wird. Dieser Abstand kann beispielsweise zwischen $1 \mu\text{m}$ und $2,5 \mu\text{m}$ betragen, während der Abstand des Elements zum Substrat größer als $2,5 \mu\text{m}$ sein kann. Alternativ, kann das lateral verlaufende Element bei mehr als 25 % des Abstandes, vorteilhafterweise bei mehr als 30 % und noch vorteilhafter bei mehr als 45 % von sowohl dem Substrat als auch der Membran entfernt angeordnet sein. Das lateral verlaufende Element kann im Wesentlichen mittig zwischen Substrat und Membran angeordnet sein. Dies hat den Vorteil, dass sowohl der erste Abschnitt als auch der zweite Abschnitt des Abstandshalters in einer maximalen Länge, welche prozesstechnisch möglich ist, ausgebildet werden können. Dabei dient dann das lateral verlaufende Element nicht notwendiger Weise als Rückseitenspiegel. Der elektrische Pfad von der Membran zu dem Substrat wird also maximiert bzw. verlängert sich, wodurch der thermische Widerstand steigt.

In einer vorteilhaften Weiterbildung ist das lateral verlaufende Element als Reflektor für einfallende elektromagnetische Strahlung, insbesondere Licht bzw. Infrarotlicht, ausgebildet. Dabei muss der reflektierende Teil des lateral verlaufenden Elements unter der

Membran ausgebildet sein, so dass durch die Membran einfallendes Licht auf die Membran zurückreflektiert wird. Somit kann das Licht nochmals von der Membran, insbesondere der Absorptionsschicht der Membran, aufgenommen werden.

- 5 Ein Strahlungsdetektor, wie er in diesem ersten Aspekt der Erfindung und auch den Weiterbildungen beschrieben wurde, kann hergestellt werden, indem der erste und der zweite Abschnitt jeweils mittels ALD in Öffnungen einer ersten und/oder zweiten Opferschicht erzeugt werden. Mittels ALD sind dünne Metallschichten möglich. Durch die Opferschichten kann eine bestimmte Form erreicht bzw. vorgegeben werden. Die Öffnungen können
- 10 durch Ätzen jeweils eines Loches in die erste bzw. zweite Opferschicht hergestellt werden. Vorteilhafterweise geschieht das Ätzen mittels eines DRIE-Prozesses, wobei als DRIE-Prozess insbesondere ein Bosch- und/oder Gyro-Prozess genutzt werden kann.

Vorteilhafterweise kann ein Prozess, um einen oben beschriebenen Strahlungsdetektor

15 herzustellen, in folgenden Verfahrensschritten vorstattengehen.

1. Strukturierung einer ersten Opferschicht, sodass selbige ein Loch aufweist;
2. Aufbringen einer ersten Lage an leitfähigem Material in dem Loch und auf der
- 20 ersten Opferschicht zur Erzeugung einer ersten leitfähigen Schicht;
3. Strukturierung der ersten Lage an leitfähigem Material, sodass selbiges in dem Loch einen ersten Abschnitt eines Abstandshalters und auf der ersten Opferschicht ein lateral verlaufendes Element bildet;
- 25 4. Erzeugen einer zweiten Opferschicht auf der ersten Opferschicht;
5. Strukturieren der zweiten Opferschicht, sodass selbige ein Loch aufweist;
- 30 6. Aufbringen und Strukturieren einer zweiten Lage an leitfähigem Material, sodass selbiges in dem Loch in der zweiten Opferschicht einen zweiten Abschnitt eines Abstandshalters bildet, der über das lateral verlaufende Element mit dem ersten Abschnitt elektrisch in Reihe geschaltet ist;
- 35 7. Entfernen der ersten und zweiten Opferschicht.

Gemäß einem zweiten Aspekt wird ein Strahlungsdetektor hinsichtlich der thermischen Isolierung der Membran gegenüber dem Substrat verbessert, indem ein Abstandshalter eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht aufweist, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat schleifenförmig durch den Abstandshalter erstreckt. Somit ist ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter, über den die Membran vorteilhafterweise mit dem Substrat elektrisch kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat und Membran, der beispielsweise wegen Herstellungsbeschränkungen, wie sie oben erwähnt wurden, oder aus anderen Gründen, wie z.B. dem Wunsch nach einem Viertelwellenlängenabstand zwischen Membran und einem Reflektor, eingeschränkt ist.

Durch die schleifenförmige Ausgestaltung des Abstandshalters bzw. der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht des Abstandshalters kann der elektrische Pfad und damit auch der thermische Pfad zwischen Membran und Substrat über den reinen Membran/Substrat-Abstand hinaus verlängert werden. Somit steigt der thermische Widerstand bei gleichem Bauraum, der durch den Abstand einerseits und die laterale Ausdehnung der Membran und ihrer Aufhängung andererseits festgelegt ist. Wie in den Erläuterungen zur Gleichung 3 erklärt, ist die thermische Isolierung (entspricht einem thermischen Widerstand) der Membran eine maßgebliche Größe für die sogenannte Noise Equivalent Temperature Difference (NETD). Diese definiert die Temperaturänderung eines Objekts, die eine Änderung des Messsignals generiert, welches dem Rauschen des Systems entspricht. Somit ist diese ein Maß für die Empfindlichkeit des Sensors. Durch die Verlängerung des elektrischen und damit thermischen Pfades kann also eine erhöhte Empfindlichkeit des Sensors erreicht werden.

Ein solcher zumindest ein Abstandshalter zur Halterung der Membran mit einer durch denselben führenden elektrisch und thermisch leitfähigen, schleifenförmigen Schicht kann mittels ALD und einem Opferschichtverfahren hergestellt werden, wobei eine erste und zumindest eine zweite Opferschicht abgeschieden werden kann, mit welchen die Form der schleifenförmigen elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht erzeugt werden kann. Es kann also durch Opferschichten eine Form vorgegeben werden, in welche dann mittels ALD eine elektrisch und thermisch leitfähige, vorteilhafterweise schleifenförmige Schicht abscheidbar ist. In einem weiteren Prozessschritt kann dann die jeweilige Opferschicht bzw. es können sämtliche Opferschichten durch Ätzen entfernt werden und es verbleiben vorteilhafterweise die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht, die Membran und das Substrat.

Der zumindest eine Abstandshalter kann in einer vorteilhaften Weiterbildung der zweiten Ausführungsform aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen gebildet sein. Diese sind vorteilhafterweise paarweise an ihren oberen oder unteren Enden verbunden. Oberes bzw. unteres Ende bedeutet in diesem Zusammenhang, das vom Substrat entfernte Ende bzw. dem Substrat zugewandte Ende. Zumindest zwei Säulen können über ein lateral verlaufendes Element an ihrem unteren Ende miteinander verbunden sein. Eine Struktur mit jeweils zwei Säulen, welche über jeweils ein lateral verlaufendes Element an ihren unteren Enden miteinander verbunden sind, kann wiederholt werden, wobei die einzelnen Paare an Säulen, welche an ihrem unteren Ende durch ein lateral verlaufendes Element miteinander verbunden sind, jeweils an ihrem oberen Ende miteinander verbunden werden können. Somit kann sich ein elektrischer Pfad durch eine Reihe an Paaren aus zwei Säulen bilden, welche elektrisch miteinander in Reihe geschaltet sind. Auf diese Weise kann der elektrische Pfad verlängert und damit auch der thermische Widerstand fast beliebig erhöht werden.

Der zumindest eine Abstandshalter könnte aber auch als eine Säule ausgebildet sein, in deren Wand die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht gefaltet angeordnet ist. In dieser Weiterbildung kann durch die gefaltete Anordnung der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht an der Wand der Säule sehr platzsparend ein langer elektrischer Pfad erreicht werden. Platzsparend bedeutet in diesem Zusammenhang, dass für den elektrisch und thermisch leitfähigen Pfad, der den Abstandshalter bildet, in einer Draufsicht (also in Richtung der Normale des Substrats) auf den Strahlungsdetektor wenig Fläche benötigt wird, um den Abstandshalter zu bilden. Durch die gefaltete Struktur der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht können die einzelnen Lagen der Schichten sehr nahe beieinander sein. Die einzelnen Lagen können vorzugsweise so angeordnet werden, dass die Säule, welche den Abstandshalter bildet, sich aus mehreren ineinander befindlichen, koaxialen, zylinderförmigen Lagen zusammensetzt. Da die einzelnen Lagen an ihren Enden des Zylinders miteinander elektrisch verbunden sein können, kann ein sehr langer elektrischer Pfad erreicht werden. Dabei wird die koaxiale Achse der Säule als Achse des Strahlungsdetektors bezeichnet.

Es sind zumindest zwei verschiedene Strukturen mit einer gefalteten elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht am Rand der Säule denkbar. In der ersten Struktur kann die gefaltete, elektrisch und thermisch leitfähige Schicht in der Wand der Säule so angeordnet sein, dass sich in der Schnittfläche auf einer Seite der Achse der Säule der elektrische Pfad ausbilden kann. Als Schnittfläche wird dabei die bereits beschriebene Schnittfläche,

welche senkrecht zum Substrat ausgebildet ist, bezeichnet. Die Schnittfläche kann also zumindest an einer Seite durch die Normale des Substrats aufgespannt werden und die andere Seite der Schnittfläche kann sich parallel zu der Oberfläche des Substrats befinden. Diese Weiterbildung hat den Vorteil, dass der komplette Umfang der Säule bzw. der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht, welche die Säule bildet, für den elektrischen Pfad benutzt werden kann. Somit kann ein elektrischer Strom, welcher von der Membran zum Substrat fließt, über den kompletten Umfang der Säule von der Kontaktierung, welche der Membran zugewandt ist, bis zu der Kontaktierung, welchem dem Substrat zugewandt ist, gelangen. Die Säule kann also symmetrisch aufgebaut sein. Da in dieser Struktur der komplette Umfang der Wand der Säule für den elektrisch leitfähigen Pfad benutzt werden kann, kommt es bei einer abschnittswisen Beschädigung der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht, welche sich über ein Umfangssegment in einem bestimmten Bereich der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht erstreckt, nicht zu einem Ausfall der elektrischen Leitfähigkeit von einem zum anderen Ende der Säule. Der elektrisch leitfähige Pfad kann sich immer noch über den verbleibenden Umfang der Wand der Säule ausbilden, so dass die Beschädigung ohne Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit bleibt.

In einer alternativen Struktur der Weiterbildung, in der die Abstandshalter als eine Säule ausgebildet sind, in deren Wand die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht gefaltet angeordnet sein kann, kann die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht in einem Querschnitt der Säule (der Querschnitt in Draufsicht) vorzugsweise zumindest drei Ringe bilden. Dabei gehören Zwischenräume zwischen den vorzugsweise zumindest drei Ringen zu Hohlräumen, die vorzugsweise beide an einem dem Substrat abgewandten Ende vorteilhafterweise zumindest teilweise geöffnet sind. Diese Weiterbildung hat den Vorteil, dass die Opferschicht, welche die Zwischenräume zwischen den zumindest drei Ringen bilden kann, gut weggeätzt werden kann. Insbesondere kann im Vergleich zu der ersten Struktur relativ viel Platz oder Fläche bestehen, um Ätzmedium zwischen die Ringe in die Zwischenräume einzuführen. Somit kann die Opferschicht in den Zwischenräumen zuverlässig und schnell durch Ätzen entfernt werden, da das Ätzmedium einfach und zuverlässig in den kompletten Hohlraum in ausreichender Menge gelangen kann. Warum dies bei dieser Weiterbildung leichter möglich ist, wird im Folgenden noch erläutert bzw. ersichtlich werden.

Bei beiden Strukturen kann während der Herstellung eine Belegung der Innenwände der Säule mit einer Opferschicht vorgesehen sein. Die Innenwände der Säule können jeweils

durch einzelne Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht gebildet sein. Die Opferschicht soll später vor Auslieferung bzw. vor dem Release entfernt werden bzw. entfernt werden können.

- 5 In der ersten Struktur kann eine einzelne Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht im Lochboden vorzugsweise durch Ionenätzen entfernt werden. Somit kann, bevor die nächste Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht abgeschieden wird, in der Schnittfläche die Verbindung im topfförmigen Lochboden unterbrochen werden. Dies geschieht insbesondere bei der zweiten und der weiteren, zweiten Lage der
- 10 elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht im Lochboden. Also kann nach Fertigstellung des Strahlungsdetektors Ätzmedium durch die Achse des Abstandshalters zwischen die äußerst und die mittlere Lage des Abstandshalters eingeführt werden, um die dort befindliche Opferschicht wegzuzäten. Die Wegstrecke durch die Achse des mehrlagigen Abstandshalters ist relativ weit. Dies macht es schwierig ist, Ätzmedium bis zum Lochboden
- 15 zu transportieren und im Weiteren auch zu verteilen, um die komplette Opferschicht zwischen der äußeren und mittleren Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht zu entfernen.

- Aus diesem Grund kann in der zweiten Struktur die Symmetrie gebrochen werden. Im
- 20 Vergleich zur ersten Struktur kann Ätzmedium direkt zwischen die äußere und die mittlere Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht eingeführt werden, um die dort befindliche Opferschicht wegzuzäten. Durch eine Öffnung, die an dem Substrat abgewandten Ende der Säule angebracht ist, kann leicht Ätzmedium in den äußeren der beiden Zwischenräume eingeführt werden bzw. es kann auch Ätzmedium in den inneren Zwischenraum zwischen der inneren Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht
- 25 und der mittleren Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht, welche im Herstellungsprozess auch mit einer Opferschicht bedeckt wurde, eingeführt werden. Somit kann also zuverlässig, einfach und schnell Ätzmedium in die beiden genannten Zwischenräume eingeführt werden.

30

Des Weiteren vereinfacht diese Geometrie (mit gebrochener Symmetrie) auch das abschließende vollständige Entfernen des Ätzmediums, so dass das Ätzmedium im laufenden Betrieb nicht an die Umwelt gelangen kann.

Beide Weiterbildungen des zweiten Aspekts können in einem mehrstufigen Opferschichtverfahren auf eine Art und Weise erzeugt werden, die der oben bezüglich des ersten Aspekts ähnelt.

- 5 In einem weiteren Aspekt, welcher prinzipiell auch mit den bisher aufgezählten Ausführungsformen kombinierbar ist, wird bei einem Strahlungsdetektor ein Substrat mit einer Vertiefung versehen, die sich auf der der Membran zugewandten Seite des Substrats in dem Substrat in einer Richtung weg von der Membran erstreckt. Der Strahlungsdetektor umfasst einen Abstandshalter zur Halterung der Membran, der sich in die Vertiefung in
10 dem Substrat erstreckt. Vorteilhaft an diesem Aspekt ist, dass eine zusätzliche Wegstrecke gebildet werden kann, welche sich zumindest teilweise in das Substrat erstreckt. Dabei steigt bei gleichem Abstand zwischen Substrat und Membran die Länge des Abstandshalters, die somit eine größere thermische Isolierung bilden kann. Der elektrische Pfad von der Membran zur elektrischen Kontaktierung des Substrats bleibt erhalten und
15 der thermische Widerstand des Abstandshalters steigt. Das Substrat kann eine integrierte Ausleseschaltung aufweisen mit Schaltungselementen derselben, die an einer der Membran abgewandten Seite des Substrats gebildet sind. Dabei kann eine Metallisierungsschicht zur Kontaktierung der Schaltungselemente miteinander auf einer Höhe zwischen der der Membran zugewandten Seite des Substrats und dem Boden der Vertiefung des
20 Substrats angeordnet sein. Diese kann die elektrische Verbindung zwischen den Schaltungselementen vornehmen. Anders ausgedrückt, kann der Boden der Vertiefung tiefer liegen als eine der Verdrahtungsebenen des Substrats.

Somit kann sich der Abstand zwischen der Kontaktierung des Substrats, welche vorteil-
25 hafterweise mit der integrierten Ausleseschaltung verbunden ist, um die Wegstrecke der Vertiefung in dem Substrat verlängern. Ohne den Membran/Substrat-Abstand zu verlängern und damit das durch diese leben eingeschlossene Volumen zu vergrößern, kann also der thermische Widerstand des Abstandshalters vergrößert und damit die Empfindlichkeit des Detektors verbessert werden.

30

In einer vorteilhaften Weiterbildung kann auch die der Membran zugewandte Seite des Substrats zumindest an den Flächen, welche sich direkt unter der Membran befinden, metallisiert werden. Hierdurch kann einfallende elektromagnetische Strahlung, insbesondere Licht oder Infrarotlicht, zurück auf die Membran reflektiert werden. Somit kann bei
35 einfallender elektromagnetischer Strahlung, insbesondere Licht oder Infrarotlicht, die Temperaturänderung der Absorber der Membran steigen. Vorteilhafterweise befindet sich

die Metallisierung, welche als Reflektor fungiert, im Wesentlichen in dem bereits erläuterten vorteilhaften Abstand (siehe Gl. 1).

In einem Aspekt bzw. einer Weiterbildung, welche mit sämtlichen bisher genannten Ausführungsformen oder Weiterbildungen kombiniert werden kann, kann zumindest ein Abstandshalter so ausgebildet sein, dass dieser eine Wandrauigkeit oder Wandwelligkeit aufweist. Diese kann eine Amplitude (w) von größer als 30 nm aufweisen. Hierdurch kann Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder die resultierende Wegverlängerung reduziert werden. Dies kann beispielsweise durch Scallops erreicht werden. Die Amplitude der Scallops kann größer als 30 nm sein. Scallops können mikroskopische, bogenförmige Strukturen sein. Aufgrund dieser Struktur, kann der resultierende thermische Leitwert ebenfalls durch eine resultierende Wegverlängerung der Abstandshalter reduziert werden. Die resultierende Wegverlängerung durch die Amplitude der Wölbung der Scallops des zumindest einen Abstandshalters kann mehr als 5 %, oder 10 % oder 20 % betragen. Die Scallops bzw. die Wandrauigkeit und/oder Wandwelligkeit können erzeugt werden, indem vorteilhafterweise Löcher in einer Opferschicht für die Abscheidung von Abstandshaltern so geätzt werden, dass diese eine Wandrauigkeit oder Wandwelligkeit aufweisen. Werden nun die Wände der Löcher in der oder den Opferschichten metallisiert, z. B. beim Abscheiden der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht, so bilden sich die besagten Scallops. Diese können Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte reduzieren. Prinzipiell kann der Phononentransport aber auch durch andere Strukturen bzw. Oberflächenausgestaltungen als Scallops erreicht werden, sofern sichergestellt ist, dass die die Form oder Struktur der Oberfläche der Weg verlängert wird und/oder Phononentransport reduziert wird. Die besondere Struktur der Löcher kann erreicht werden, indem z. B. in einem Bosch-Prozess die Ätzdauer eines einzelnen Ätzvorgangs deutlich erhöht wird. Da bei einem chemischen Ätzen, wie z. B. in einem Bosch-Prozess die Ätzung in sämtliche Richtungen stattfindet, also ungerichtet ist, bildet sich dann die gewünschte bogenförmige Struktur aus. Alternativ sind beispielsweise auch Prozesse denkbar, bei denen zuerst beispielsweise durch Ionenätzen in einem einzelnen Ätzschritt in eine gewisse Tiefe in Richtung der Normalen des zu ätzenden Lochs bzw. des Substrats geätzt werden kann und anschließend eine ungerichtete, d. h. gleichmäßige Ätzung in sämtliche Richtungen vorgenommen werden kann. Auf diese Art und Weise kann durch eine Mischung aus Ionenätzen und chemischen Ätzen, welche alternierend passieren, die gewünschte bogenförmige Struktur erzeugt werden.

In einer vorteilhafter Weiterbildung, welche mit sämtlichen Ausführungsformen kombinierbar ist, kann während der Herstellung des Strahlungsdetektors auf den zumindest einen Abstandshalter bzw. die einzelnen Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht oder die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht eine Ätzschutzschicht abgeschieden werden. Durch diese Ätzschutzschicht kann erreicht werden, dass während Ionenätzen und/oder chemischen Ätzen die Metallisierung nicht beschädigt wird, sondern lediglich die erste, zweite oder dritte Opferschicht weggeätzt wird.

Vorteilhafterweise beträgt die Wanddicke der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht des zumindest einen Abstandshalters zwischen 0,1 nm und 1 µm oder zwischen 1 nm und 0,5 µm oder besonders vorteilhafterweise zwischen 10 nm und 100 nm.

Der Strahlungsdetektor kann ein Bolometer sein. In einer vorteilhaften Ausführungsform können mehrere Strahlungsdetektoren zu einem Array zusammengefügt sein, so dass wie bei einer CCD-Kamera ein Bild, welches sich aus einem Array aus Pixeln zusammensetzt, aufgenommen werden kann. Erfindungsgemäß kann aber natürlich ein Infrarotlicht-Bild detektiert/aufgenommen werden.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend Bezug nehmend auf die Zeichnungen näher erläutert.

Fig. 1 zeigt eine schematische Zeichnung eines herkömmlichen Strahlungsdetektors in einer Schnittebene, in der zumindest eine Seite der Schnittebene durch die Normale des Substrats aufgespannt wird;

Fig. 2 zeigt eine REM-Aufnahme eines herkömmlichen 25 µm Pixel-Pitch-Mikrobolometer-Arrays mit einer Kontaktierung der Membran über Stege;

Fig. 3 zeigt einen schematischen Querschnitt in der Horizontalen eines Nanotube-Kontakts bestehend aus zwei Materialien zur Kontaktierung der Membran und eines herkömmlichen Abstandshalters;

Fig. 4a - 4d zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während der Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem Ausführungsbeispiel, bei dem der Abstandshalter sich in einen ersten und zweiten Abschnitt gliedert;

Fig. 5a - 5f zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während der Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem Ausführungsbeispiel, bei dem der Abstandshalter aus einer Reihe von Säulen gebildet ist, um einen sich schleifenförmig in einer Schnittebene senkrecht zum Substrat erstreckenden elektrischen Pfad zu bilden;

Fig. 6a - 6g zeigen eine Weiterbildung der Fig. 5, ebenfalls in Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während der Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel, bei dem der Abstandshalter aus einer Reihe von Säulen gebildet ist, um einen sich schleifenförmig in einer Schnittebene senkrecht zum Substrat erstreckenden elektrischen Pfad zu bilden, wobei die Membran sich in einer Höhe oberhalb des Substrats befindet, die kleiner ist als eine maximale Ausdehnung des Abstandshalters in Richtung weg vom dem Substrat;

Fig. 7a - 7j zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während seiner Herstellung gemäß einem Ausführungsbeispiel, bei dem in der Wand des Abstandshalters eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht, welche den elektrisch leitfähigen Pfad bildet, gefaltet angeordnet ist, hier mit symmetrischem Aufbau;

Fig. 8a - 8d zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während seiner Herstellung gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel, bei dem in der Wand des Abstandshalters eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht, welche den elektrisch leitfähigen Pfad bildet, gefaltet angeordnet ist, hier mit einem Aufbau, der nicht gleich entlang des Umfangs des Abstandshalters ist, um eine Opfermaterialentfernung zu vereinfachen;

Fig. 9a - 9e zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während seiner Herstellung bei dem der elektrische Pfad zwischen Membran und Substrat verlängert wird, indem der Abstandshalter, der Teil des elektrischen Pfads ist, sich in eine Vertiefung im Substrat erstreckt;

Fig. 10a - 10d zeigen Seitenschnittansichten eines Strahlungsdetektors in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stadien während seiner Herstellung wobei der thermische Widerstand des Abstandshalters erhöht wird durch Scallops, welche eine bogenförmige Form der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht des Abstandshalters sicherstellen, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte sowie durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

Im Folgenden werden, mit Bezug auf die Figuren, Realisierungsformen zur Herstellung von speziellen Nanotube-Mikrobolometern beschrieben. Der Prozessablauf ist jeweils in einer einfachen Form dargestellt. Ein Aspekt liegt hier bei der Anordnung bzw. Herstellung der Nanotubes, um die thermische Isolierung weiter zu verbessern. In allen Varianten kann das skizzierte Schutzoxid unter der Sensorschicht weggelassen werden. Auf der Sensorschicht kann sich außerdem ein Absorber befinden (getrennt durch eine isolierende Schicht). Zudem kann die elektrisch leitende Schicht in den Nanotubes von weiteren Schutzschichten umgeben sein. Die im Folgenden dargestellten Realisierungsformen können miteinander, mit dem angehobenen Reflektor oder auch anderen Strukturen kombiniert werden.

Fig. 1 zeigt einen Aufbau eines herkömmlichen Strahlungsdetektors, insbesondere Infrarotdetektors oder Bolometers. An ihm werden prinzipielle Funktionsweisen erklärt. Der herkömmliche Strahlungsdetektor 1 zeigt ein Substrat 2, welches eine Ausleseschaltung 6 (Engl.: Read Out Integrated Circuit, kurz: ROIC) beinhaltet. Von dem Substrat 2 befindet sich in einem Abstand d beabstandet eine Membran 3. Die Membran 3 wird durch einen Metallkontakt 17 in dem Abstand d von dem Substrat 2 gehalten. Auf dem Substrat 2 befindet sich in Richtung der Membran 3, also der Membran 3 zugewandten Seite, eine Metallisierung 2m, welche als Reflektor für einfallendes Licht oder einfallende elektromagnetische Strahlung wirkt. Die Membran 3 setzt sich zusammen aus einer Sensorschicht 3b, welche dem Substrat 2 zugewandt ist, und einer Absorberschicht, welche sich auf der dem Substrat abgewandten Seite der Membran 3 befindet. Die thermische Isolierung der Membran 3 und damit der Sensorschicht 3b und der Absorberschicht passiert im Wesentlichen durch die Metallkontakte 17. Des Weiteren kann die thermische Isolierung der Membran weiter verbessert werden durch Stege 4s, welche mit den Metallkontakten 4k verbunden sind. In Fig. 1 ist durch den Strahlungsdetektor ein vertikaler Schnitt in der xz-Ebene dargestellt. Eine Draufsicht (in der xy-Ebene) wird in Fig. 2 dargestellt. Dabei sieht man die Metallkontakte 4k, welche von den beiden Stegen 4s kontaktiert werden und so die Metallkontakte 4k mit der Membran 3 elektrisch verbinden. Es ist offensichtlich, dass

die Breite der Stege 4s den thermischen Widerstand von der Membran zu den Metallkontakten 4k wesentlich bestimmt (siehe Gl. 4). Zur Bestimmung des thermischen Widerstands bzw. des thermischen Leitwerts der Stege 4s fließen die Breite b_{Steg} und die Dicke d_{Steg} (also der Querschnitt des Stegs in orthogonaler Richtung zur Flussrichtung des Stroms) der Stege 4s wesentlich ein. Die Stege 4s bestehen im Wesentlichen aus Metall, so dass der spezifische Leitwert λ_i nicht wesentlich beeinflusst werden kann.

Ein Querschnitt durch ein Nanotube, welches in Fig. 3 in der xy-Ebene dargestellt ist, und welches zur Aufhängung der Membran bzw. der Beabstandung der Membran 3 von dem Substrat 2 dient, wurde bereits in der WO 2016 / 005 505 A2 beschrieben. Die Abstandshalter 4, nehmen die thermische Isolierung der Membran 3 vom Substrat 2 bei gleichzeitiger elektrischer Kontaktierung der elektromagnetischen Strahlungsdetektoren vor. Dabei sind die Abstandshalter als z. B. ausreichend lange und dünn beschichtete Hohlröhrchen (daher Nanotubes genannt) ausgebildet. Diese können mit Technologien und Prozessen aus der Mikrosystemtechnik hergestellt werden. Dabei ist der thermische Leitwert der Abstandshalter (Nanotubes) im Vergleich zu den Stegen aufgrund der dickeren Metallbeschichtung der Stege sehr klein und kann damit signifikant zu einer thermischen Isolierung beitragen. Das wird erzielt, indem die Wände der in dieser Ausführungsform exemplarisch rund dargestellten Abstandshalter, hinreichend dünn mit einer Metallschicht beschichtet sind, woraus ein sehr geringer thermischer Leitwert resultiert. Dieser lässt sich gemäß Gl. 5 berechnen. In Fig. 3 sind die Radien $r_{1,1}$, $r_{1,2}$ bzw. $r_{2,1}$ sowie $r_{2,2}$ dargestellt. Es sind jedoch auch Abstandshalter denkbar, die aus mehr als zwei Schichten bestehen. Wie in Gl. 5 ersichtlich, ist der Querschnitt bzw. die effektive Querschnittsfläche der einzelnen Schichten (in Fig. 3 in der xy-Richtung dargestellt) wesentlich für den thermischen Leitwert des gesamten Abstandshalters. Effektive Querschnittsfläche ist dabei die zusammenhängende Fläche im Querschnitt, welche aus einem bestimmten Material besteht.

Es werden hier jedoch prozesstechnisch Grenzen erreicht, welche den effektiven Querschnitt der Abstandshalter nach unten limitieren, da irgendwann keine stabilen Nanotubes mehr herstellbar sind. Der elektrische Pfad, welcher sich zwischen Membran und Substrat ausbilden kann, soll aber einen geringeren thermischen Leitwert aufweisen.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele für Realisierungsformen von Nanotube-Mikrobolometern beschrieben, bei denen der Abstandshalter - auch als thermisches Via bezeichnet - durch Anpassung der Geometrie oder mikroskopischen Struktur des Ab-

standshalters in seiner thermischen Isolierfähigkeit verbessert und/oder leichter herstellbar gemacht wird.

Die nachfolgend beschriebenen Nanotubes können beispielsweise mittels eines Opferschichtprozesses hergestellt werden. Dabei wird zunächst ein Loch in die Opferschicht geätzt und im Anschluss beschichtet. Für das Ätzen des Lochs kann zum Beispiel der sog. Boschprozess verwendet werden, da es hiermit möglich ist steile Kantenwinkel bei großen Aspektverhältnissen zu erzeugen. Die Schichten können mittels Atomlagenabscheidung abgeschieden werden, sodass selbst bei den erwähnten steilen Kantenwinkeln die geätzten Löcher bedeckt sind. Im Weiteren können die abgeschiedenen Schichten je nach Herstellungsprozess strukturiert werden. Außerdem kann die Opferschicht entfernt werden, sodass die gefertigten Nanotubes frei stehen.

1. Multi-Level Nanotube Bolometer

In dem in Fig. 4a-d dargestellten Ausführungsbeispiel eines Strahlungsdetektors, der auch als Multi-Level-Nanotube-Bolometer bezeichnet wird, geschieht dies, indem der Abstandshalter 4 entlang seiner Länge, also entlang der Richtung zwischen Membran 3 und Substrat 2, in Abschnitte gegliedert wird, die also mit ihrer jeweiligen Länge in der Richtung zwischen Membran 3 und Substrat 2 verlaufen. Ein lateral verlaufendes Element 5 befindet sich in dem elektrischen Pfad zwischen der Membran 3, welche sich aus vorzugsweise einer optionalen Schutzschicht 3a und einer Sensorschicht 3b zusammensetzt, und einer Metallisierung 2m des Substrats 2. Das lateral verlaufende Element 5 sitzt zwischen dem ersten Abschnitt 4a und dem zweiten Abschnitt 4b des Abstandshalters 4. Der erste und zweite Abschnitt 4a, 4b des Abstandshalters 4 sind lateral versetzt zueinander und über das lateral verlaufende Element 5 miteinander verbunden. Somit sind der erste und der zweite Abschnitt 4a, 4b und das lateral verlaufende Element 5 elektrisch, aber auch thermisch in Reihe geschaltet. Dabei kann das dem Substrat 2 abgewandte Ende des zweiten Abschnitts 4b elektrisch über eine zweite Lage 25 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht mit der Membran 3 elektrisch verbunden werden, also einer Lage 25, die sich in der Membranebene befindet und beispielsweise als ein weiterer Steg ausgebildet sein kann, zusätzlich zum lateral verlaufenden Element, oder als Rahmen um die eigentliche Membran. Der erste Abschnitt 4a des Abstandshalters 4 kann dabei elektrisch mit der Metallisierung 2m des Substrats 2 verbunden werden. Prozesstechnisch kann ein solcher Strahlungsdetektor 1 in einem mehrstufigen Opferschichtverfahren her-

gestellt werden (s. Fig. 4a-d), welches beispielsweise folgende Schritte oder Stufen beinhaltet.

Ausgangspunkt kann in einem Substrat 2 bestehen, auf dem sich eine Metallisierung 2m befindet, wie es in Fig. 4a gezeigt ist.

a) In einem ersten Prozessschritt kann dann eine erste Opferschicht 9 das Substrat 2 (bzw. den ROIC 6, insbesondere auf die Metallisierung 2m des Substrats 2) aufgebracht werden.

b) In einem zweiten Prozessschritt wird die Opferschicht 9 strukturiert. In dem Beispiel von Fig. 4b ist gezeigt, dass ein Loch 7 in die erste Opferschicht 9 geätzt wird. Dies kann vorzugsweise durch ein DRIE- (z.B. ein Bosch- oder Gyro-) Verfahren geschehen. Alternativ ist auch Ionenätzen denkbar, um möglichst in Richtung der Normalen, d. h. in z-Richtung des Substrats 2, ätzen zu können. Dabei kann das Ätzen in Richtung der Normalen bzw. der z-Richtung automatisch durch die Metallisierung 2m des Substrats 2 beendet werden. Danach wird eine erste Lage 15 eines elektrisch leitfähigen Materials auf die erste Opferschicht 9 und in das Loch 7 abgeschieden. Dazu wird beispielsweise Atomlagenabscheidung bzw. ALD oder alternativ andere Verfahren, wie z.B. CVD, verwendet. Anschließend kann die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht strukturiert werden, so dass sich das lateral verlaufende Element auf der Oberfläche der ersten Opferschicht 9 ausbildet bzw. verbleibt sowie das in dem Loch 7 verbleibende elektrisch leitfähige Material einen ersten Abschnitt des später vollendeten Abstandshalters 4 bildet.

c) Eine zweite Opferschicht 10 wird dann aufgebracht, also z.B. auf die komplette Struktur bzw. ganzflächig abgeschieden. Anschließend kann die Membran 3, welche sich aus der optionalen Schutzschicht 3a und der Sensorschicht 3b, wie z.B. Halbleitermaterial, zusammensetzt, auf die zweite Opferschicht 10 abgeschieden und strukturiert werden. Entweder vor oder nach dem Abscheiden der Membran 3 kann ein weiteres Loch 7b in die Opferschicht 10 geätzt oder anders strukturiert werden. Der Strukturierungsvorgang kann in z-Richtung nach unten in Richtung des Substrats 2 durch das lateral verlaufende Element 5 limitiert werden bzw. das Material des letzteren als Ätzstopp verwenden.

d) Als folgender Prozessschritt wird eine zweite Lage 25 elektrisch leitfähigen Materials aufgebracht (beispielsweise mittels ALD abgeschieden). Dies geschieht z.B. ganzflächig, um in dem Loch 7b einen weiteren Abschnitt des Abstandshalters 4 zu bilden, sowie einen lateralen Abschnitt 25 auf der Höhe der Membran 3, der den besagten Abschnitt mit der Sensorschicht der Membran 3 verbindet, zu bilden. Es bildet sich demnach ein sogenanntes Nanotube in dem Loch 7b in der zweiten Opferschicht 10, der den zweiten Abschnitt 4b des Abstandshalters 4 bildet. Anschließend wird das aufgebrachte bzw. abgeschiedene elektrisch leitfähige Material strukturiert. Dies kann geschehen, indem ein (schmäler) Pfad an elektrisch und thermisch leitfähigem Material zwischen der Membran 3 und dem zweiten Abschnitt 4b des Abstandshalters 4 auf der bisher erzeugten Anordnung übrig gelassen wird.

In anderen Worten können bei dieser Ausführungsform mehrere Nanotubes in unterschiedlichen Ebenen übereinander strukturiert und elektrisch miteinander verbunden werden, sodass ein Kontakt zwischen Sensorschicht und ROIC ermöglicht wird.

Der Vorteil ist, dass die thermische Isolierung durch die zusätzlichen Nanotubes weiterhin verbessert werden kann, ohne die Absorberfläche zu beeinflussen. Nach Gl. 4 wird der resultierende thermische Leitwert maßgeblich durch die Länge der Nanotubes beeinflusst.

Der Ätzwinkel des verwendeten Bosch-Prozesses limitiert jedoch die Opferschichtdicke, da der Durchmesser des Lochbodens mit steigender Ätztiefe deutlich schmaler wird und somit die mechanische Stabilität der gefertigten Nanotubes beeinträchtigt. Durch die hier beschriebene Anordnung können effektive Nanotube-Längen erreicht werden, welche aufgrund der geschilderten Problematik mit der Strukturierung eines einzelnen Nanotubes nicht möglich sind.

Die Verbindungsschicht zwischen den Nanotubes kann außerdem als Reflektor genutzt werden. Der in den Figuren 4a bis 4d dargestellte Prozessablauf skizziert beispielhaft eine Realisierung mit zwei Nanotubes. Prinzipiell kann der Prozess auf eine beliebige Anzahl von Nanotubes erweitert werden (limitiert durch Gesamt-Stress des Wafers nach Abscheidung der einzelnen Opferschichten sowie mechanische Stabilität der später freistehenden Struktur).

Die folgenden Verfahrensschritte sind in den Figuren 4a bis 4d gezeigt:

- Abscheidung der ersten Opferschicht auf einem Substrat (ROIC)
- Strukturierung der Opferschicht (z.B. mittels des Bosch-Prozesses), Abscheidung (z.B. mittels Atomlagenabscheidung) und Strukturierung einer elektrisch leitenden Schicht
- Abscheidung der zweiten Opferschicht, Abscheidung und Strukturierung eines Schutzoxides sowie einer Sensorschicht
- Strukturierung der zweiten Opferschicht (z.B. mittels des Bosch-Prozesses), Abscheidung und Strukturierung einer elektrisch leitenden Schicht

Der besondere Vorteil bei diesem Verfahren ist folgender. Rein praktisch ist die Ätztiefe beim Bosch-Prozess in eine Opferschicht limitiert, da ein Bosch-Prozess einen Ätzwinkel aufweist und somit der Durchmesser des Lochbodens 7 mit steigender Ätztiefe schmaler wird. Dies beeinträchtigt oder limitiert die mechanische Stabilität der gefertigten Nanotubes. Indem der Abstandshalter 4 in einen ersten und einen zweiten Abschnitt 4a, 4b aufgliedert wird, kann aber ein Abstandshalter 4 erreicht werden, welcher eine längere effektive (Nanotube-) Länge aufweist als durch die prozesstechnischen Gegebenheiten eigentlich zunächst möglich erscheinend. Zusätzlich kann der elektrische Widerstand durch das lateral verlaufende Element 5 vergrößert werden. Dabei können sich die Kontaktierungen des lateral verlaufenden Elements 5 mit dem ersten Abschnitt 4a bzw. zweiten Abschnitt 4b an entgegengesetzten Enden des lateral verlaufenden Elements 5 befinden. Somit kann ein langer Pfad erreicht werden, was den thermischen Leitwert weiter reduziert.

Es wurde demnach gemäß Fig. 4 ein Strahlungsdetektor mit einem Substrat 2 und einer Membran 3 beschrieben, der zumindest einen Abstandshalter 4 zur a) Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur b) elektrischen Kontaktierung der Membran 3 mit beispielsweise einem Kontakt oder Anschluss oder gar einer Auswerteschaltung auf bzw. in dem Substrat und zur c) thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des Substrats 2 aufweist. In einer Richtung zwischen Substrat 2 und Membran 3, d.h. in vertikaler Richtung in den Figuren, ist der zumindest eine Abstandshalter 4 in einen ersten Abschnitt 4a und einen zweiten Abschnitt 4b gegliedert, deren Länge jeweils

weniger als einen Abstand zwischen Substrat 2 und Membran 3 überbrückt. In dem dargestellten Beispiel waren es zwei, aber es können natürlich auch mehr sein. Der erste und zweite Abschnitt 4a, 4b sind lateral zueinander versetzt und über ein lateral verlaufendes Element 5 verbunden sind. Der erste und der zweite Abschnitt 4a, 4b sind über das lateral verlaufende Element 5 elektrisch in Reihe geschaltet, d.h. es verläuft zwischen denselben, und verbindet beispielsweise das obere Ende des einen Abschnitts mit dem unteren (dem Substrat zugewandten) Ende des anderen Abschnitts. Das lateral verlaufende Element 5 trägt weniger oder gleich zu einem thermischen Widerstand des zumindest einen Abstandshalters 4 bei als eine Summe der thermischen Widerstände des ersten und zweiten Abschnitts 4a, 4b, d.h. die Abstandshalterabschnitte sind jeweils von der Sorte wie sie eingangs schon beschrieben wurden, die ausgelegt sind, nicht nur die elektrische Leitung zwischen Membran und Substrat zu ermöglichen, sondern auch die thermische Leitung möglichst zu reduzieren. Ein Querschnitt elektrisch leitfähigen Materials 8 des ersten und zweiten Abschnitts (4a, 4b) ist beispielsweise kleiner oder gleich als $7 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $3 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $0,8 \mu\text{m}^2$ gewählt, um ein geeignetes thermische Widerstandsverhalten zu erzielen, wobei andere Werte natürlich auch denkbar sind. Das lateral verlaufende Element 5 ist beispielsweise mittig angeordnet bzw. der Membran-zu-Substrat-Abstand gleichmäßig unter den Abschnitten aufgeteilt, so dass in dem Fall von zwei Abschnitten das Element 5 im Wesentlichen mittig zwischen Substrat 2 und Membran 3 angeordnet ist. Möglich ist aber auch, dass das Element 5 beispielsweise mehr als 25% des Abstands oder mehr als 30 % des Abstands oder mehr als 45 % des Abstands von sowohl dem Substrat 2 als auch der Membran 3 entfernt angeordnet ist. Obwohl nicht gezeigt ist es möglich, dass das lateral verlaufende Element 5 als Reflektor 5a für einfallende elektromagnetische Strahlung ausgebildet ist und hierzu zwischen, nämlich sowohl in Schichtdickenrichtung als auch lateral gesehen, der Membran und dem Substrat verläuft.

2. Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer

In Fig. 5 wird ein weiteres Ausführungsbeispiel gezeigt. Dabei kann der thermische Leitwert reduziert werden, indem ein lateral verlaufendes Element 5 zwischen einer ersten und einer zweiten Opferschicht 9, 10 im Prozess verwendet wird, um eine Kehre des Abstandshalters 4 zu erreichen. Ein möglicher Prozess mit den beispielsweise, einzelnen Prozessschritten zur Erzeugung eines solchen Strahlungsdetektors in einer sogenannten Vertikal-Mäander-Nanotube-Ausführung kann die Prozessschritte a) bis f) umfassen (wie in Fig. 5 a - 5f). Zunächst wird der Strahlungsdetektor im Endprodukt (aber vor dem vor-

zugsweise vollständigen Wegätzen der Opferschichten 9, 10) beschrieben, wie in Fig. 5f dargestellt. Auf der Metallisierung 2m eines Substrats 2 kann sich eine erste Opferschicht 9 befinden, über der sich eine zweite Opferschicht 10 befinden kann. Auf der zweiten Opferschicht 10 kann sich eine Membran 3 befinden, welche sich aus einer optionalen Schutzschicht 3a und einer Sensorschicht 3b zusammensetzen kann. Die Membran 3, insbesondere deren Sensorschicht 3b, kann damit mit einer zweiten Lage 25 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht kontaktiert werden. Dabei kann der elektrische Kontakt zwischen der Membran 3 und der Metallisierung 2m hergestellt werden durch einen durchgehenden Abstandshalterabschnitt 14d, im Folgenden auch als Säule bezeichnet, welcher (bzw. welche) durch die erste Opferschicht 9 und die zweite Opferschicht 10 bis zu der Metallisierung 2m penetrieren kann. Zwischen dem durchgehenden Abstandshalterabschnitt 14d, welcher sich von der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 bis zu der Metallisierung 2m des Substrats 2 erstreckt, und der Membran 3 sind im elektrischen Pfad ausgehend von der Membran 3 weitere Abstandshalterabschnitte bzw. -säulen 14z angeordnet. Diese erstrecken sich jedoch lediglich durch die zweite Opferschicht 10 bis zu einem lateral verlaufenden Element 5. Dabei erstreckt sich in elektrischer Flussrichtung ein Abstandshalterabschnitt 14z von der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 bis zu dem lateral verlaufenden Element 5 und ein weiterer Abstandshalter 14z von dem lateral verlaufenden Element 5 bis zur Oberseite der zweiten Opferschicht 10. Dabei ist der elektrische Kontakt zwischen den beiden genannten Abstandshaltern 14z an der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 unterbrochen. Die elektrische Verbindung bzw. der elektrische Pfad des Abstandhalters erfolgt lediglich über das lateral verlaufende Element 5 zwischen den Opferschichten in einer Höhe zwischen Membran und Substrat. Ein Ende einer Struktur, wie sie gerade beschrieben wurde, bestehend aus zwei Abstandshalterabschnitten 14z und einem lateralen Element 5 ist dabei mit der Membran 3 verbunden und das andere Ende mit dem durchgehenden Abstandshalterabschnitt 14d, welcher sich von der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 bis zu der Metallisierung 2m erstreckt. Wie in Fig. 5 f ersichtlich, könnten beliebig viele solche gerade beschriebenen Paar-Strukturen aneinander gereiht werden, so dass sich der elektrische und somit auch thermische Pfad verlängerte. Die einzelnen Strukturen bestehend aus zwei Abstandshalterabschnitten 14z und einem lateralen Element 5 können dabei an der Oberseite miteinander verbunden werden. Es kann also eine Reihenschaltung vorliegen. Somit kann sich ein elektrischer Pfad von der Membran 3 bis zu dem durchgehenden Abstandshalterabschnitt 14d ausbilden, welcher direkt mit der Metallisierung 2m verbunden ist. Der elektrische Pfad sollte lang sein und nach Möglichkeit durch sämtliche der beschriebenen Struk-

turen, welche jeweils ein lateral verlaufendes Element 5 und zwei Abstandshalterabschnitt 14z beinhalten, eines Strahlungsdetektors 1 gehen.

Prozesstechnisch kann eine solche Struktur folgendermaßen hergestellt werden:

- 5
- a) Wenn noch nicht vorhanden, Aufbringen einer Metallisierung 2m auf das Substrat 2. Anschließend Aufbringen einer ersten Opferschicht 9 und Aufbringen einer ersten Lage 15 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 auf die erste Opferschicht 9. Die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 kann aus Metall
- 10 sein. Dabei kann das Aufbringen der ersten Opferschicht 9 durch Abscheiden (z.B. durch CVD oder ähnliche Verfahren) geschehen. Das Aufbringen der ersten Lage 15 kann durch Abscheiden, insbesondere durch ALD, geschehen.
- b) Strukturierung der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Aus dieser ersten Lage 15 kann das mindestens eine lateral verlaufende Element 5 gebildet werden. Dieses wiederum kann eine untere Kehre für den vertikalen Mäander bilden. Der vertikale Mäander bzw. viele aneinandergereihte vertikale Mäander bilden dabei den Abstandshalter 4.
- 15
- c) Aufbringen (beispielsweise durch Abscheiden) der zweiten Opferschicht 10 sowie Aufbringen (beispielsweise durch Abscheiden) und Strukturieren der Membran 3. Diese kann eine optionale Schutz- und Sensorschicht 3a, 3b aufweisen. Die Sensorschicht 3b kann aus einem Halbleitermaterial bestehen.
- 20
- d) Anbringen (beispielsweise durch Ätzen) von Löchern 7. Dies kann beispielsweise mittels des Bosch- oder Gyro-Prozesses geschehen. Die Wände der Löcher 7 können später beschichtet werden. Dies kann beispielsweise durch Atomlagenabscheidung (ALD) geschehen. Dabei kann ein Loch 7 durch die erste und zweite Opferschicht 9, 10 geätzt werden bis zur Metallisierung 2m des Substrats 2
- 25
- und jeweils zwei Löcher 7, welche jeweils ein lateral verlaufendes Element 5 terminiert werden.
- 30
- e) Abscheidung einer zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8, vorzugsweise mittels ALD. Diese kann dazu dienen die Membran 3 elektrisch mit der Metallisierung 2m des Substrats 2 zu verbinden.
- 35

- f) Strukturierung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Hierdurch kann sich ein mäanderförmiger Pfad über die Abstandshalterabschnitte 14z und das lateral verlaufenden Element bzw. die lateral verlaufenden Elemente 5 bilden. Dieser ist vorzugsweise möglichst lang. Dabei kann ein elektrischer Pfad von der Membran 3 durch die beschriebenen Strukturen aufweisend jeweils ein lateral verlaufendes Element 5 und zwei Abstandshalter 14 gehen. Die zwei Abstandshalter 14z werden nach unten in Richtung des Substrats 2 durch das lateral verlaufende Element 5 beendet. Dadurch sind die beschriebenen Strukturen elektrisch in Reihe schaltbar bis zu demjenigen (durchgehenden) Abstandshalter 14d, welcher sich von der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 bis zur Metallisierung 2m erstreckt. Durch diesen durchgehenden Abstandshalter 14d wird also eine elektrische Verbindung zur Metallisierung 2m erreicht werden. Die beschriebenen Strukturen können sich von der Membran 3 gesehen aus mäanderförmig von der Oberseite der zweiten Opferschicht 10 in Richtung der Grenze zwischen der ersten und zweiten Opferschicht 9, 10 ausbilden. Insgesamt kann so ein schleifenförmiger elektrischer Pfad bis zur Metallisierung 2m erreicht werden.

In anderen Worten können bei dieser Ausführungsform mehrere Nanotubes in einem vertikalen Mäander angeordnet werden. Dafür sind $2n+1$ Nanotubes erforderlich, wobei das erste Nanotube den Kontakt zum ROIC herstellt und das letzte Nanotube den Kontakt zur Sensorschicht. Ein Schritt hierfür ist die Aufteilung der Opferschicht in zwei Teile, wobei nach dem ersten Teil in einigen Bereichen eine elektrisch leitfähige Schicht erzeugt wird, die für eine Kehre des Mäanders genutzt wird. Ein möglicher Prozessablauf ist im Folgenden skizziert (ohne Beschränkung der Allgemeinheit an einem Beispiel für drei Nanotubes):

- Abscheidung des ersten Teils der Opferschicht sowie einer elektrisch leitenden Schicht (z. B. Metall),
- Strukturierung der elektrisch leitenden Schicht, sodass die untere Kehre für den vertikalen Mäander entsteht,
- Abscheidung des zweiten Teils der Opferschicht sowie Abscheidung und Strukturierung einer Schutz- und der Sensorschicht,
- Ätzung von Löchern, deren Wände später mittels Atomlagenabscheidung

beschichtet werden, z.B. mittels des BOSCH-Prozesses,

- Atomlagenabscheidung einer elektrisch leitenden Schicht, und
- Strukturierung einer elektrisch leitfähigen Schicht.

5 **3. Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer mit versenkter Membran**

Die in der Fig. 6 dargestellte Ausführungsform ist relativ ähnlich zu der in Fig. 5 dargestellten Ausführungsform. Allerdings befindet sich die Membran 3 zwischen der ersten Opferschicht 9 und der zweiten Opferschicht 10, um hernach näher an dem Substrat zu sein als ein Ort maximalen Abstands des Abstandshalters. Des Weiteren weist der elektrische Pfad der Abstandshalters vorliegend nur eine Schleife auf, die im Unterschied zur Fig. 5 zum Substrat hin weist bzw. offen ist. Dabei ist das Endprodukt vor dem Abätzen in Fig. 6 g) dargestellt. Ein erstes lateral verlaufendes Element 5 zwischen der ersten Opferschicht 9 und der zweiten Opferschicht 10 kontaktiert die Membran 3 elektrisch. Um dieses lateral verlaufende Element 5 nach außen hin zu kontaktieren zu können, kann ein erster Abstandshalterabschnitt 14e vorgesehen sein, welcher durch die zweite Opferschicht 10 bis zu einem oberen zweiten lateral verlaufenden Element 5 durchdringen kann. Ein weiterer, durchgehender Abstandshalterabschnitt 14d ist vorgesehen, welcher von der nach außen gewandten Fläche der zweiten Opferschicht 10, also vom oberen Element 5, bis zu der Metallisierung 2m des Substrats 2 führt. Zwischen diesen beiden Abstandshalterabschnitten 14e, 14d könnten sich weitere Strukturen, bestehend aus jeweils zwei Abstandshalterabschnitten 14z und jeweils einem weiteren lateral verlaufenden Element 5 befinden, das ebenfalls in der Höhe zwischen der ersten und der zweiten Opferschicht 9, 10 angeordnet sein könnte. Durch die zweite Opferschicht 10 könnten beispielsweise zwei weitere Löcher 7 realisiert werden, welche dann mit leitfähigem Material ausgekleidet werden, um weitere Abstandshalterabschnitte 14z zu bilden. Auf diese Weise kann der Abstandshalter aus einer über lateral verlaufende Elemente 5, wie z.B. Stege, mechanische, elektrisch und thermisch in Reihe geschaltete Abstandshalteranschnitte 14 aufweisen. Anders ausgedrückt kann der Abstandshalter über den Abstandshalterabschnitt 14e, welcher direkt über ein lateral verlaufendes Element 5 mit der Membran 3 verbunden ist, und den Abstandshalterabschnitt 14d, welcher von der Oberfläche der zweiten Opferschicht 10 bis zu der Metallisierung 2m führt, hinaus dazwischengeschaltete Abschnitte 14z mit wiederum dazwischen befindlichen lateral verlaufenden Elementen aufweisen. Auf diese Weise kann der elektrische Pfad und damit der thermische Widerstand verlängert bzw. vergrößert werden bzw. der thermische Leitwert des elektrischen Pfades kann reduziert werden.

Prozesstechnisch kann eine solche Struktur wie in den Fig. 6 a) - f) dargestellt hergestellt werden:

- 5 a) Falls noch nicht vorhanden kann auf eine Metallisierung 2m eines Substrats 2 eine Opferschicht 9 aufgebracht werden. Diese kann abgeschieden werden. Hierbei kann das Substrat 2, wie auch in den anderen Ausführungsformen eine integrierte Ausleseschaltung 6 (Engl.: Read Out Integrated Circuit, kurz: ROIC) enthalten.
- 10 b) Aufbringung bzw. Abscheidung der Membran 3. Dies kann durch Aufbringen, insbesondere Abscheiden, beispielsweise in Reihenfolge zuerst eines optionalen Schutzoxid 3b und anschließend einer Sensorschicht 3a auf das optionale Schutzoxid 3b geschehen (wie bei Fig. 5, außer dass in Fig. 6 in dem hier dargestellten Ausführungsbeispiel die Membran 3 auf die erste Opferschicht 9 statt auf die zweite Opferschicht 10 abgeschieden werden kann). Die Sensorschicht 3a kann Halbleitermaterial aufweisen.
- 15 c) Aufbringung (beispielsweise durch Abscheidung) und Strukturierung einer ersten Lage 15 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Somit kann/können aus der elektrischen ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 das/die lateral verlaufenden Elemente 5 gebildet werden, welche zumindest die Membran 3 kontaktieren können und/oder welche die Kehlen für die optional vorhandenen jeweils zwei Abstandshalterabschnitte 14z bilden können, welche lediglich die zweite Opferschicht 10 durchdringen sollen. Zum Abscheiden der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 kann ALD verwendet werden.
- 20 d) Aufbringung und/oder Abscheidung der zweiten Opferschicht 10 auf die bisher erzeugte Anordnung.
- 25 e) Strukturierung der zweiten Opferschicht 10. Dies kann Ätzen von Löchern 7 beispielsweise mittels DRIE (vorzugsweise des Bosch-Prozesses) oder mittels Ionenätzens umfassen. Dabei kann ein Loch 7 sowohl durch die erste als auch zweite Opferschicht 9, 10 penetrieren und ein weiteres Loch 7 kann lediglich durch die zweite Opferschicht 10 zu dem lateralen Element 5 penetrieren, welches die Membran 3 elektrisch kontaktiert.
- 30
- 35

- f) Aufbringung, insbesondere Abscheidung, und Strukturierung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Dies kann mittels Lithographie und/oder Ionenätzens geschehen. Somit kann sich ein elektrischer Pfad von der Membran 3 bis zu der Metallisierung 2m ausbilden. Falls mehrere Schleifen über lateral verlaufende Elemente 5 gebildet werden, welche jeweils durch zwei Abstandshalterabschnitte 14z kontaktiert werden, kann der elektrische Pfad folgendermaßen strukturiert werden. Er kann von dem lateral verlaufenden Element 5, welches die Membran 3 kontaktiert, über den damit direkt verbundenen Abstandshalterabschnitt 14e zu dem Abstandshalterabschnitt 14d gehen, welcher durch die erste und zweite Opferschicht 9, 10 zu der Metallisierung 2m des Substrats 2 geht. Dazwischen kann er die einzelnen Strukturen, welche sich aus jeweils einem lateral verlaufenden Element 5 und zwei Abstandshalterabschnitten 14 zusammensetzen, elektrisch in Reihe verbinden. Eine solche Struktur ist in Fig. 6g dargestellt. Im Vergleich zu der in Fig. 5f dargestellten Ausführungsform ist der Vorteil dieser Ausführungsform in Fig. 6f und 6g, dass der Reflektor, welcher sich in Fig. 5f beispielsweise unter der Membran 3, d. h. zwischen der Membran 3 und der Metallisierung 2m befindet, entfallen kann. Die Metallisierung 2m unter der Membran 3 der in Fig. 6a -6g dargestellten Ausführungsform kann nämlich, als Reflektor für einfallende elektromagnetische Strahlung, insbesondere Licht oder Infrarotlicht, fungieren. Die einzelnen Strukturen, insbesondere die Löcher 7, können ebenfalls in Schritt e) hergestellt werden. Ihre Herstellung kann wie die Herstellung der Strukturen erfolgen, welche in Fig. 5a -5f beschrieben wurden.

In anderen Worten ist diese Ausführungsform angelehnt an die zuvor beschriebene Ausführungsform 2. Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer. In diesem Fall befindet sich die Membran in der ersten Ebene. Es sind $2n + 2$ Nanotubes erforderlich, um den elektrischen Kontakt zwischen ROIC und der Sensorschicht zu ermöglichen.

Ein Vorteil ist, dass der angehobene Reflektor entfallen kann, da das untere Metall ebenfalls als reflektierende Schicht fungieren kann. Der Abstand zwischen der Membran und der unteren Metallschicht kann über die Dicke der ersten Opferschicht so gewählt werden, dass die Resonatorbedingung erfüllt ist. Die Länge des ersten Nanotubes (definiert durch Dicke der beiden Opferschichten) kann demnach unabhängig von der Resonatorbedin-

gung gewählt werden. Der in den Figuren 6a bis 6f gezeigte Prozessablauf zeigt die Realisierung mit zwei Nanotubes in entsprechender Reihenfolge der Figuren:

- (Fig. 6a) Abscheidung der ersten Opferschicht auf einem Substrat (ROIC)
- 5 • (Fig. 6b) Abscheidung und Strukturierung eines Schutzoxides sowie einer Sensorschicht
- (Fig. 6c) Abscheidung und Strukturierung einer elektrisch leitenden Schicht
- (Fig. 6d) Abscheidung der zweiten Opferschicht
- 10 • (Fig. 6e) Strukturierung der zweiten Opferschicht
- (Fig. 6f) Abscheidung und Strukturierung einer elektrisch leitenden Schicht

Bezüglich der Figuren 5 und 6 wurden somit Strahlungsdetektoren mit einem Substrat 2
 15 und einer Membran 3 beschrieben, die zumindest einen Abstandshalter 14 zur Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur elektrischen Kontaktierung der Membran 3 mit einem auf dem Substrat befindlichen Kontakt und zur thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des Substrats 2 aufweisen. Der zumindest eine Abstandshalter 14 weist dabei eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 auf, die sich in
 20 einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat 2 schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter 14 erstreckt. Die Schnittfläche kann geknickt verlaufen, aber auch eine Ebene sein, nämlich die Schnittebene der gezeigten Figuren. Ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter 14 in der Schnittfläche, also der Pfad, der sich durch den Schnitt besagter Schnittfläche mit der Schicht 8 ergibt, über den die Membran 3 mit
 25 einem Kontakt oder einer Schaltung auf bzw. in dem Substrat kontaktiert ist, ist länger als ein Abstand zwischen Substrat 2 und Membran 3 ist (als ein Effekt der schleifenförmigen Ausformung). Der zumindest eine Abstandshalter 14 ist dabei aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen bzw. Abschnitten 14 gebildet, die paarweise an ihren oberen Enden oder unteren Enden verbunden sind, um zusammen mit diesem Element einer Schleife zu bilden. Zumindest zwei Säulen sind auf diese Weise über ein lateral verlaufendes Element 5 an ihrem oberen oder unteren Ende verbunden. Das lateral verlaufende Element 5 könnte beispielsweise zwischen 10 % und 50 % oder zwischen 20 und 40 % oder

zwischen 25 und 30 % des Abstandes zwischen Membran 3 und Substrat 2 vom Substrat 2 entfernt angeordnet sein. Da das lateral verlaufende Element in diesem Aspekt relativ nahe zum Substrat 2 angeordnet sein kann, kann der elektrische Pfad, welcher durch die einzelnen Säulen gebildet wird, relativ lange sein. Somit kann sich eine hoher thermischer Widerstand einer einzelnen Säule, bzw. durch eine Säule, ein lateral verlaufendes Element 5 und eine weitere an das lateral verlaufende Element 5 angeschlossene Säule (also auch der gesamten Struktur) ergeben. Möglich wäre es, dass ein lateral verlaufendes Element 5, das zwei obere oder zwei untere Enden von Abschnitten bzw. Säulen des Abstandshalters 14 verbindet bzw. überbrückt, sich zumindest teilweise unter der Membran 3 erstreckt, um einen Reflektor zu bilden. Möglich wäre es ferner, dass ein lateral verlaufendes Element 5, das zwei ober oder zwei untere Enden von Abschnitten bzw. Säulen des Abstandshalters 14 verbindet bzw. überbrückt, gleichweit von, oder weiter von, dem Substrat 2 beabstandet ist verglichen zu der bzw. als die Membran 3. Das bzw. die lateral verlaufenden Elemente 5, über das bzw. die der elektrische Pfad von Membran 3 zu Substrat 2 durch den Abstandshalter 14 führt, kann bzw. können (im Falle mehrerer im Sinne Ihres Summenwiderstands) auch hier beispielsweise weniger zu einem thermischen Widerstand des Abstandshalters 14 beitragen als eine Summe der thermischen Widerstände der Abstandshalterabschnitte 14 z bzw. -säulen, d.h. die Abstandshalterabschnitte 14z sind jeweils von der Sorte wie sie eingangs schon beschrieben wurden, die ausgelegt sind, nicht nur die elektrische Leitung zwischen Membran 3 und Substrat 2 zu ermöglichen, sondern auch die thermische Leitung möglichst zu reduzieren. Ein Querschnitt des elektrisch leitfähigen Materials 8 der einzelnen Abschnitts bzw. Säulen ist beispielsweise kleiner oder gleich als $7 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $3 \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $0,8 \mu\text{m}^2$ gewählt, um ein geeignetes thermische Widerstandsverhalten zu erzielen, wobei andere Werte natürlich auch denkbar sind.

Für alle bisher beschriebenen Ausführungsbeispiele gilt, dass das lateral verlaufende Element 5 als Steg ausgebildet sein kann. Seine Länge kann mindestens das 2-fache seiner Breite oder mehr als das 5-, 10- oder 20-fache der Breite betragen. Dies hat den Vorteil, dass der thermische Widerstand eines lateral verlaufenden Elements 5 umso größer ist, je geringer seine Breite ist und je größer seine Länge ist. Somit können, wenn die Kontaktierung, z.B. durch die Säulen, Abstandshalterabschnitte 14z und oder Abstandshalter 4, 14, 14e an entgegengesetzten Enden des Stegs ausgebildet ist, die volle Länge des Stegs bzw. des lateral verlaufenden Elements 5 als thermischer Widerstand benutzt werden.

4. Konzentrisches Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer mit ungebrochener Symmetrie (Figuren 7a bis 7j)

5. Konzentrisches Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer mit gebrochener Symmetrie (Figuren 8a bis 8d)

In Fig. 7a -7j und Fig. 8a-d sind sogenannte konzentrische Vertikal-Mäander-Nanotube-Strahlungsdetektoren dargestellt. Diese unterscheiden sich von den in Fig. 5a - 5f und 6a-6g dargestellten Ausführungsformen u. a. dadurch, dass die einzelnen Lagen einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 zumindest teilweise so ineinander angeordnet sein sind, so dass sich eine schleifenförmige, im Wesentlichen koaxiale Struktur bilden kann, in welcher sich der elektrische Pfad von der Membran 3 bis zu der Metallisierung 2m des Substrats 2 ausbilden kann, und zwar in der Wand des Abstandshalters 14 selbst. Dabei kann der Abstandshalter 14 wiederum in einer Säulenform ausgebildet sein, wobei an der Wand der Säule 45 die einzelnen Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 so beabstandet angeordnet sind, dass mit einem geringen Flächenbedarf in der Draufsicht (xy-Ebene) bzw. lateral gesehen ein langer elektrisch leitfähiger Pfad von der Membran 3 bis zu der Metallisierung 2m des Substrats 2 erreicht werden kann, wiederum in der oben schon erwähnten Schnittfläche senkrecht zum Substrat betrachtet. Da die einzelnen Lagen 15, 25, 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 an der Wand der Säule 45, welche den Abstandshalter 14 bildet, koaxial um die Achse z eines in die erste Opferschicht 9 geätzten Loches 7 angeordnet sein können, kann ein elektrischer Pfad ausgebildet werden, welcher mehrfach im Wesentlichen von der nach außen gewandten Fläche (in der Draufsicht in axialer Richtung des Abstandshalters 4) der ersten Opferschicht 9 bis zur Metallisierung 2m des Substrats 2 gehen kann. Es kann also die Wegstrecke, welche durch die erste Opferschicht 9 gebildet wird, mehrfach für den elektrischen Pfad genutzt werden.

Es können zumindest zwei verschiedene Ausführungsformen gebildet werden: Zum einen ein solcher Strahlungsdetektor 1 mit ungebrochener Symmetrie (s. Fig. 7) und zum anderen ein Strahlungsdetektor 1 mit gebrochener Symmetrie (siehe Fig. 8). Bei den in Fig. 7 und 8 dargestellten Ausführungsformen können während der Herstellung die Innenwände der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 mit einer Opferschicht 10, 11 ausgekleidet werden, so dass auf die dann jeweils die nächste Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 abgeschieden werden kann. Dies kann prinzipiell mehrfach wiederholt werden. Somit kann durch die mehrfache Wiederholung der Abscheidung einer Op-

ferschicht 10, 11 und anschließender Abscheidung einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 eine schleifenförmige Struktur erreicht werden, welche auf engem Raum in Draufsicht (d. h. in der xy-Ebene) mehrfach den Abstand von der Metallisierung 2m bis zur entgegengesetzten Fläche der ersten Opferschicht 9 durchqueren kann. Dies kann den elektrischen Pfad verlängern und somit zu einem erhöhten thermischen Widerstand bzw. einem geringen thermischen Leitwert führen. Prozesstechnisch kann die in Fig. 7j dargestellte Struktur in einem mehrstufigen Verfahren erzeugt werden. Dies kann in den Schritten geschehen, welche in den Fig. 7a bis Fig. 7j dargestellt sind, und im Folgenden beschrieben wird:

10

a) Falls erforderlich, Aufbringen einer ersten Opferschicht 9. Dies kann insbesondere durch Abscheidung geschehen. Dabei kann auf ein Substrat 2, insbesondere auf eine Metallisierung 2m eines Substrats 2 kann die erste Opferschicht 9 abgeschieden werden.

15

b) Anbringen von Löchern in die erste Opferschicht 9. Dies kann geschehen indem für jeden Abstandshalter 4 bzw. jede Säule ein Loch 7 geätzt wird oder anders erzeugt wird. Beispielsweise geschieht dies mittels eines DRIE-Prozesses (insbesondere des Bosch-Prozesses) oder mittels Ionenätzens. Dabei kann das Loch 7 näherungsweise senkrecht durch die erste Opferschicht 9 ausgebildet sein.

20

c) Abscheidung der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8, beispielsweise mittels Atomlagenabscheidung (Engl.: Atomic Layer Deposition, kurz: ALD) und anschließende Strukturierung. Durch die Strukturierung kann erreicht werden dass die abgeschiedene erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 im Wesentlichen nur in dem Loch 7 ausgebildet ist. Anschließend kann eine zweite Opferschicht 10 beispielsweise mittels ALD abgeschieden werden. Dies kann über der kompletten Struktur geschehen. Somit kann sowohl die erste Opferschicht 9 als auch die Innenseite der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 in dem Loch 7 bedeckt sein.

25

30

d) Chemisch mechanisches Polieren. Dabei kann erreicht werden, dass auf der Oberfläche, insbesondere in Richtung der Normalen des Substrats 2 (also in z-Richtung), sich oberhalb der ersten Opferschicht 9 keine zweite Opferschicht 10

35

oder Überreste der ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 15 befinden bzw. diese entfernt werden.

- 5 e) Abscheidung einer zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Dies kann auf der ersten Opferschicht 9 und innerhalb der zweiten Opferschicht 10 in dem Loch 7 geschehen, so dass sich ein Zwischenraum 45zwa zwischen der ersten Lage 15 und der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 bilden kann.
- 10 f) Strukturierung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Dies kann beispielsweise mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen geschehen. Es kann also erreicht werden, dass die zweite Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 im Wesentlichen nur so weit außerhalb des Loches 7 ausgebildet ist, dass die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 elektrisch kontaktiert werden kann.
- 15 g) Abscheidung einer weiteren zweiten Lage 11 der Opferschicht. Dies kann mittels ALD oder Chemical Vapor Deposition (CVD) geschehen. Anschließend kann eine Aufbringung bzw. Abscheidung und Strukturierung einer optionalen Schutzschicht 3a und einer Sensorschicht 3b, welche die Membran 3 bilden können, geschehen. Die Sensorschicht 3b kann Halbleitermaterial umfassen.
- 20 h) Anschließend wird z. B. (Ionen-) Ätzen innerhalb des Abstandshalters 14 vorgenommen werden. Hierdurch wird die weitere zweite Lage 11 der Opferschicht im Lochboden entfernt. Dabei kann auch die zweite elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 25 im Lochboden entfernt werden. Die zweite Opferschicht 10 kann jedoch (bei diesem Ätzvorgang) erhalten bleiben. Diese kann später verhindern, dass eine später abgeschiedene dritte Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 die Metallisierung 2m des Substrats 2 elektrisch direkt kontaktieren kann.
- 30 i) Abscheidung einer weiteren zweiten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Diese kann die Membran 3, insbesondere die Sensorschicht 3b, elektrisch und thermisch kontaktieren. Diese kann innerhalb der zweiten weiteren Opferschicht 11 in den Topf abgeschieden werden und kann die zweite Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 25 elektrisch direkt innerhalb des ge-
- 35

ätzten Loches 7 kontaktieren. Es können nun also sowohl ein Zwischenraum 45zwi zwischen der dritten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 als auch ein Zwischenraum 45zwa zwischen der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 vorhanden sein. Die einzelnen Lagen 15, 25, 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 können dabei im Wesentlichen zylinderförmig ausgebildet sein. Die zweite und dritte Lage 25, 35 der elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 können nun durch einen gemeinsamen Topfboden an der der Metallisierung 2m zugewandten Seite des Loches 7 elektrisch miteinander verbunden sein. Auf der gegenüberliegenden Seite, welche nach außen gewandt ist, können die zweite und dritte Lage 25, 35 elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 elektrisch isoliert, also nicht direkt elektrisch miteinander verbunden, sein. Allerdings können die zweite Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 und die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 an der nach außen gewandten Seite elektrisch direkt verbunden sein. Die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und die zweite Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 können aber auf der der Metallisierung 2m zugewandten Seite elektrisch isoliert, also nicht direkt elektrisch miteinander verbunden sein.

- j) Strukturierung der dritten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Auf der beschriebenen Anordnung kann lediglich ein schmaler Pfad zwischen der Membran 3 und dem Abstandshalter 14 verbleiben, welcher von elektrischem Strom durchflossen werden kann. Der Pfad sollte deswegen schmal sein, da je schmaler der Pfad ist, der thermische Widerstand gemäß Gl. 1 umso größer ist. Damit kann sich der thermische Leitwert dieses Pfades verringern. Allerdings kann die minimale Breite des Pfades nach unten limitiert sein, da dieser eine mechanische Stabilität aufweisen sollte.

Abschließend, wobei dieser Schritt auch vor Schritt j) oder während des Schritts j) erfolgen kann, erfolgt ein Ionenätzen im Lochboden. Hierdurch kann die dritte Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 im Lochboden entfernt werden. Dies dient dazu, damit durch den Lochboden in der Zwischenschicht 45zwa zwischen der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 Ätzmedium eingeführt werden kann, um die

zweite Opferschicht 10 final wegätzen zu können. Die weitere, zweite Opferschicht 11 kann ohne ein solches Loch wegätzt werden, da prozesstechnisch automatisch eine Öffnung besteht zwischen der weiteren, zweiten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8, welche zumindest nach dem Wegätzen der ersten Opferschicht 9 von außen zugänglich ist.

Bei der in Fig. 7a – 7j dargestellten Ausführungsform (siehe die Beschreibung bei Schritt j)) steht also im Lochboden 7 eine relativ kleine Öffnung zur Verfügung, um die dritte Opferschicht 11 wegzuätzen. Dies kann in der Ausführungsform, welche in den Fig. 8a - 8d dargestellt ist, verbessert werden.

In Fig. 8a - 8d wird ein Strahlungsdetektor 1 beschrieben in einer sogenannten konzentrischen vertikalen mäanderförmigen Nanotube-Ausführungsform mit gebrochener Symmetrie. Dabei unterscheiden sich die Schritte a) bis e), der Ausführungsform, welche in den Fig. 8a - 8d dargestellt ist, nicht von den bereits in Fig. 7a - 7e beschriebenen Schritten. Die in der in Fig. 8a - 8d dargestellte Ausführungsform unterscheidet sich ab Schritt f) in der Strukturierung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Der Herstellungsprozess der Ausführungsform, welche in den Fig. 8a – 8d dargestellt ist, wird also ab dem in Fig. 7 e) dargestellten Ausgangsprodukt beschrieben. Dieser Herstellungsprozess kann folgende zusätzlichen (Herstellungs-)Schritte umfassen:

- a) Strukturierung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Beispielsweise kann dies mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen geschehen. In diesem Schritt wird die zylinderförmige Struktur gebrochen. Es wird also nur in einem Teil des Nanotubes bzw. Abstandshalter 45 geätzt. Die Strukturierung kann so von statten gehen, dass die zweite Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 in einem Abschnitt des Abstandshalters 14 weggeätzt werden kann. Somit kann von außen, d. h. von oberhalb der gesamten Anordnung und oberhalb der ersten Opferschicht 9 ein Zugang zur zweiten Opferschicht 10 bestehen zwischen der ersten Lage 15 und der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 zu einem Zwischenraum 45zwa. Die Öffnung zu diesem Zwischenraum 45zwa kann dabei so groß ausgebildet sein, dass Flüssigkeit, insbesondere Ätzmedium, leicht in den beschriebenen Zwischenraum 45zwa zwischen der ersten und der zweiten Lage 15,

25 gelangen kann. Somit kann in einem abschließenden Schritt die zweite Opferschicht 10 leicht durch Ätzen, vorzugsweise chemisches Ätzen, entfernt werden.

- 5 b) Aufbringung, z.B. durch Abscheidung, einer weiteren zweiten Opferschicht 11. Diese kann beispielsweise mittels ALD oder CVD abgeschieden werden. Dabei kann die weitere zweite Lage der Opferschicht 11 sowohl die Innenseite der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 in dem Loch 7, welche Teil des elektrischen Pfades bildet, als auch die obere Seite der bisher beschriebenen Struktur bedecken. Diese umfasst insbesondere die erste Opferschicht 9 und die nach außen gerichtete, d. h. von der Metallisierung 2m entfernten Seite der ersten und zweiten Lagen 15, 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8, welche oberhalb der ersten Opferschicht 9 abgeschieden wurde. Des Weiteren wird in diesem Verfahrensschritt die Membran 3 aufgebracht, insbesondere abgeschieden. Diese umfasst eine Sensorschicht 3a, welche auf 10 eine optionale, zuerst abgeschiedenen Schutzschicht 3b abgeschieden werden kann. Die Schutzschicht 3b kann ein Oxid umfassen und die Sensorschicht 3a kann im Wesentlichen aus Halbleitermaterial gefertigt sein.
- 15 c) Ionenätzen der Struktur. Damit wird die weitere zweite Opferschicht 11 im Lochboden 7 entfernt. Hierdurch kann ein Zugang zur zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 im Lochboden 7 geschaffen werden und diese kann kontaktiert werden. Durch Ionenätzen kann selektiv im Lochboden 7 geätzt werden, so dass die weitere zweite Opferschicht 11 nur im Lochboden 7 entfernt wird. Allerdings kann noch die weitere zweite Opferschicht 11 am Innenrand 20 der Zylinder verbleiben. Auf dieser kann nun abgeschieden werden, ohne dass an der Zylinderwand die zweite Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 elektrisch kontaktiert wird (d. h. es kann eine elektrische Isolation bestehen) durch nun abgeschiedene Schichten.
- 25 d) Aufbringen einer dritten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Dies erfolgt vorzugsweise durch Abscheidung insbesondere mittels ALD. Anschließend erfolgt eine Strukturierung der dritten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Die dritte Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 kann die Membran 3, insbesondere die Sensorschicht 3b 30 der Membran 3, elektrisch und thermisch kontaktieren und mit dem Topfboden verbinden. Wie bereits erwähnt, kann in dem Topfboden eine zweite Lage 25 der
- 35

elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 kontaktiert werden. Somit kann sich ein durchgehender elektrischer Pfad von der Membran 3 bis zur Metallisierung 2m des Substrats 2 ausbilden. Der elektrische Pfad kann dabei in elektrischer Flussrichtung von der Membran 3 über die dritte Lage 35, die zweite Lage 25, die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 bis zur Metallisierung 2m gehen. Im Unterschied zu der in Fig. 7 beschriebenen Ausführungsform geht der elektrisch leitfähige Pfad in der Schnittfläche durch die Achse z des Abstandshalters 4. Die Achse z ist in normaler Richtung des Substrats 2 durch das Loch 7 ausgebildet bzw. virtuell vorhanden. In der in Fig. 8 beschriebenen Ausführungsform kann sich der elektrische Pfad in der beschriebenen Schnittebene auf beiden Seiten der Achse z ausbilden. In Fig. 8 d) kann sich der elektrische Pfad in der beschriebenen Schnittfläche durch die Achse z zuerst ausgehend von der Membran 3 durch die der Membran 3 zugewandte Seite der dritten Lage 35 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 ausbilden. Anschließend kann er in dieser Schnittebene durch den Topfboden in Richtung der zweiten Lage 25 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 auf der der Membran 3 gegenüberliegenden Seite der Achse z des Loches 7 fließen. Dann kann er sich an der der Metallisierung 2m abgewandten Seite der ersten Opferschicht 9 in die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 ausbilden, und kann sich zum Schluss bis zur Metallisierung 2m ausbilden. Da der elektrisch leitfähige Pfad in dieser Schnittfläche sowohl auf der der Membran 3 zugewandten Seite als auch der Membran 3 abgewandten Seite fließen kann, wird diese Struktur auch als konzentrische Vertikal-Mäander-Nanotube-Strahlungsmeter mit gebrochener Symmetrie bezeichnet. Im Unterschied dazu kann der elektrische Strom in der beschriebenen Schnittfläche in Fig. 7 lediglich auf einer Seite fließen, weswegen die in Fig. 7 dargestellte Ausführungsform des Strahlungsmeters auch als konzentrisches Vertikal-Mäander-Nanotube-Strahlungsmeter mit ungebrochener Symmetrie bezeichnet wird.

Bezüglich der Figuren 7 und 8 wurden somit Strahlungsdetektoren mit einem Substrat 2 und einer Membran 3 beschrieben, die zumindest einen Abstandshalter 14 zur Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur elektrischen Kontaktierung der Membran 3 mit einem auf dem Substrat befindlichen Kontakt und zur thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des Substrats 2 aufweisen. Der zumindest eine Abstandshalter 14 weist dabei eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 auf, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat 2 schleifenförmig durch den zumindest einen

Abstandshalter 14 erstreckt. Die Schnittfläche kann geknickt verlaufen, aber auch eine Ebene sein, nämlich die Schnittebene der gezeigten Figuren. Ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter 14 in der Schnittfläche, also der Pfad, der sich durch den Schnitt besagter Schnittfläche mit der Schicht 8 ergibt, über den die Membran 3 mit einem Kontakt oder einer Schaltung auf bzw. in dem Substrat kontaktiert ist, ist länger als ein Abstand zwischen Substrat 2 und Membran 3 ist (als ein Effekt der schleifenförmigen Ausformung). Der zumindest eine Abstandshalter 14 ist als eine Säule ausgebildet, in deren Wand die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 gefaltet angeordnet ist. In der Wand der Säule 45 ist die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 gefaltet so angeordnet ist, dass in einer Schnittfläche, die längs und durch die Säule verläuft, die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht zwei Schleifen bildet. Bei Fig. 8 bildet in einem Querschnitt der Säule 45 die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 zumindest drei Ringe 45r, wobei Zwischenräume 45zw zwischen den Ringen 45r zu Hohlräumen gehören, die an einem dem Substrat 2 abgewandten Ende zumindest teilweise geöffnet sind, über welche Öffnung die Opfermaterialentfernung wie beschrieben erleichtert ist.

In anderen Worten können in der vierten Ausführungsform, die das konzentrische Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometers mit ungebrochener Symmetrie beschreibt (siehe Figuren 7a bis 7j), mehrere voneinander isolierte konzentrische Nanotubes mit unterschiedlichen Durchmessern realisiert werden, was mehreren ineinander geschachtelten Nanotubes entspricht. Ein Schritt für diese Realisierungsform ist die Belegung der Nanotube-Innenwände mit einer Opferschicht, die beim späteren Release entfernt werden kann. Eine mögliche Ausführungsform zur Herstellung ist im Folgenden beispielhaft mit Bezug auf die Figuren 7a bis 7j beschrieben:

- (Fig. 7a) Abscheidung einer Opferschicht
- (Fig. 7b) Ätzung der Löcher, deren Wände später mittels beispielsweise Atomlagenabscheidung beschichtet werden können, z.B. mittels des BOSCH-Prozesses
- (Fig. 7c) Abscheidung einer ersten leitfähigen Schicht mittels beispielsweise Atomlagenabscheidung und gegebenenfalls anschließende Strukturierung. Abscheidung einer Opferschicht mittels Atomlagenabscheidung
- (Fig. 7d) Chemisch mechanisches Polieren

- (Fig. 7e) Abscheidung einer weiteren Lage einer elektrisch leitfähigen Schicht
- (Fig. 7f) Strukturierung der elektrisch leitfähigen Schicht zum Beispiel mittels Lithographie und reaktivem Ionenätzen
- 5 • (Fig. 7g) Abscheidung einer weiteren Lage einer Opferschicht mittels Atomlagenabscheidung und mittels chemischer Gasphasenabscheidung. Abscheidung und Strukturierung einer Schutz- und Sensorschicht
- (Fig. 7h) Ionenätzen der gesamten Struktur um die Opferschicht im Lochboden zu entfernen
- 10 • (Fig. 7i) Abscheidung einer weiteren Lage einer elektrisch leitfähigen Schicht
- (Fig. 7i) Strukturierung der elektrisch leitfähigen Schicht
- (Fig. 7j) Ionenätzen zum Entfernen der elektrisch leitfähigen Schicht im Lochboden (dieser Schritt kann auch zusammen mit dem vorherigen durchgeführt werden).
- 15

Ein Problem bei der soeben beschriebenen vierten Ausführungsform kann die Öffnung des Lochbodens im letzten Prozessierungsschritt darstellen, um den Release der äußeren Opferschichtwand zu ermöglichen.

20

Alternativ dazu kann daher die zylindrische Symmetrie des Nanotubes in einem eigenen Schritt gebrochen werden. Dies führt zu der fünften Ausführungsform, die entsprechend ein Vertikal-Mäander-Nanotube-Bolometer mit gebrochener Symmetrie beschreibt (siehe Figuren 8a bis 8d).

25

Eine mögliche Ausführungsform zum Herstellen eines solchen Bolometers gemäß der fünften Ausführungsform wird nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 7a bis 7e und 8a bis 8d beispielhaft beschrieben:

30

- (Fig. 7a) Abscheidung einer Opferschicht
- (Fig. 7b) Ätzung der Löcher, deren Wände später mittels beispielsweise

Atomlagenabscheidung beschichtet werden können, z.B. mittels des BOSCH-Prozesses

- 5 • (Fig. 7c) Abscheidung einer ersten leitfähigen Schicht mittels beispielsweise Atomlagenabscheidung und gegebenenfalls anschließende Strukturierung. Abscheidung einer Opferschicht mittels Atomlagenabscheidung
- (Fig. 7d) Chemisch mechanisches Polieren
- (Fig. 7e) Abscheidung einer weiteren Lage einer elektrisch leitfähigen Schicht
- 10 • (Fig. 8a) Strukturierung der elektrisch leitfähigen Schicht zum Beispiel mittels Lithographie und reaktivem Ionenätzen, wobei die zylinderförmige Symmetrie der Struktur gebrochen wird, also nur in einem Teil des Nanotubes geätzt wird.
- (Fig. 8b) Abscheidung einer weiteren Lage einer Opferschicht mittels Atomlagenabscheidung und mittels chemischer Gasphasenabscheidung.
- 15 Abscheidung und Strukturierung einer Schutz- und Sensorschicht
- (Fig. 8c) Ionenätzen der gesamten Struktur um die Opferschicht im Lochboden zu entfernen
- (Fig. 8d) Abscheidung einer weiteren Lage einer elektrisch leitfähigen Schicht
- 20 • (Fig. 8d) Strukturierung der elektrisch leitfähigen Schicht

6. Versenktes Nanotube-Bolometer

In den Fig. 9a - 9e wird ein weiteres Ausführungsbeispiel dargestellt. Diese dargestellte
 25 Ausführungsform des Strahlungsdetektors wird auch als versenktes Nanotube-Bolometer bezeichnet. Dieses Ausführungsbeispiel kann prinzipiell mit den bisher beschriebenen Ausführungsbeispielen kombiniert werden. Das in Fig. 9e) gezeigte Ausführungsbeispiel zeigt das fertiggestellte Produkt. Allerdings wurde die Opferschicht 9 noch nicht entfernt. Der Abstandshalter 4 wird um eine zusätzliche Strecke 62 verlängert, welche sich in das
 30 Substrat 2 hinein erstreckt. Die Gesamtstrecke des Abstandshalter 61 kann sich also zusammensetzen aus dem Abstand in Normalenrichtung des Abstandshalters 4, ausgehend

von der oberen Kante des Substrats 2 zu der Membran 3 und der zusätzlichen Wegstrecke 62, welche sich von der oberen Kante des Substrats 2 bis zur Metallisierung 63 erstreckt, welche sich in einer Vertiefung 67 des Substrats 2 befindet. Dabei wird als obere Kante die Kante des Substrats 2 bezeichnet, welche der Membran 3 zugewandt sein kann. Somit kann sich der elektrische Pfad bei der in Fig. 9 dargestellten Ausführungsform verlängern. Der thermische Widerstand kann damit steigen bzw. die thermische Leitfähigkeit des elektrischen Pfades sinken.

Prinzipiell schaut ein wie in Fig. 9e) fertiggestellter Aufbau im Querschnitt in der Schnittfläche folgendermaßen aus. Ein Substrat 2 weist zumindest eine Vertiefung 67 auf, welche sich in dem Substrat 2 in einer Richtung weg von der Membran 3 erstreckt. Zumindest der Teil der Oberfläche des Substrats 2, welcher der Membran 3 zugewandt werden soll, kann vorteilhafterweise eine Metallisierung 64 aufweisen, welche dazu dienen kann, in einer vorteilhaften Weiterbildung einfallende elektromagnetische Strahlung, insbesondere Licht oder Infrarotlicht, auf die Membran 3 zurückzereflektieren. In einer Weiterbildung können die Schaltungselemente der Ausleseschaltung 6 (Engl.: Read Out Integrated Circuit, kurz: ROIC) an einer der Membran abgewandten Seite des Substrats 2 angeordnet sein. Dabei ist zumindest eine Metallisierungsschicht 65 zur Kontaktierung der Schaltungselemente miteinander auf einer Höhe zwischen der der Membran 3 zugewandten Seite des Substrats 2 bzw. der Metallisierung 64 und dem Boden der Vertiefung des Substrats 2 angeordnet. Mit dieser Metallisierungsschicht 65 können die Schaltungselemente elektrisch verbunden werden. Umgekehrt können die Schaltungselemente 6, wie z.B. Transistoren, Widerstände und Kapazitäten, in einer Höhe angeordnet sein, die tiefer liegt als der Boden der Vertiefung. Die zusätzliche Wegstrecke 62, wird ebenfalls dafür verwendet, den Abstandshalter 4 zu verlängern. Damit kann für den Abstandshalter 4 in Normalenrichtung eine Gesamtstrecke 61 zur Verfügung stehen, welche sich von der elektrischen Kontaktierung des Substrats 2 bis zu der Höhe erstrecken kann, an der die Membran 3 angeordnet sein kann. Der gesamte elektrische Pfad von der Membran 3 bis zu der Kontaktierung des Substrats 2 kann sich also zusammensetzen aus einer ersten Lage 15 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 und dem Abstandshalter 4. Prozesstechnisch kann eine solche Struktur in einem Verfahren hergestellt werden, welches z.B. die Schritte a) bis e) umfasst und nun beschrieben wird.

Ausgangspunkt kann in einem Substrat 2 bestehen, auf welchem sich eine Metallisierung 64 befindet und in welches eine elektrische Kontaktierung für den ROIC 6 vergraben ist.

- 5 a) Falls noch nicht vorhanden, kann auf ein fertiges Substrat 2, welches bereits eine Kontaktierung für den ROIC 6 aufweist, eine optionale Metallisierung 64 auf der Oberfläche des Substrats 2 aufgebracht, insbesondere abgeschieden, werden. Dies kann mittels ALD oder CVD geschehen. Dies kann zumindest dort geschehen, wo später die Membran 3 darüber angeordnet werden soll. In anderen Worten kann sich nun die Metallisierung 64 auf der der Membran 3 zugewandten Oberfläche des Substrats 2 befinden. Mit der optionalen Metallisierung 64 wird die Absorption von Licht durch die Membran 3 gesteigert. Prinzipiell ist der Strahlungsdetektor aber auch ohne die optionale Metallisierung 64 funktionsfähig.
- 10 b) In diesem Prozessschritt kann (falls noch nicht vorhanden) eine Vertiefung 67 in das Substrat 2 geätzt werden, so dass die Kontaktierung 63 des Substrats 2 zugänglich ist. Dies kann aus der Richtung geschehen, von welcher der Abstandshalter 4 angebracht werden kann. Dieser kann zur Kontaktierung der Metallisierung 63 des Substrats 2 dienen und kann somit zumindest Teil der Verbindung zwischen Membran 3 und ROIC 6 sein.
- 15 c) Auf die bisher beschriebene Struktur wird nun eine erste Opferschicht 9 abgeschieden, welche sowohl die elektrische Kontaktierung aus Metall 67 des Substrats 2 als auch den Reflektor 64 bedeckt.
- 20 d) Nun wird in die Opferschicht 9 ein Loch 7 geätzt. Somit ist zumindest ein Teil der elektrischen Kontaktierungsfläche 63 des Substrats 2 von außen zugänglich. Beispielsweise kann das Ätzen mittels eines DRIE-Prozesses (z. B. eines Bosch- oder Gyro- Prozesses) oder mittels Ionenätzens geschehen. Dabei sollte das Loch 7 einen Durchmesser aufweisen, so dass ein Abstandshalter 4 in dem Loch 7 aufgebracht, insbesondere abgeschieden, werden kann. Des Weiteren wird in diesem Prozessschritt vor oder nach dem Ätzen des Loches 7 die Membran 3 abgeschieden. In Reihenfolge wird zuerst eine optionale Schutzschicht 3a und
- 25 anschließend auf die optionale Schutzschicht 3a eine Sensorschicht 3b aufgebracht. Dies kann beispielsweise durch Abscheidung geschehen. Die Sensorschicht 3a kann Halbleitermaterial umfassen.
- 30 e) Zum Abschluss wird nun eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8, 15 abgeschieden. Somit ist die Membran 3, insbesondere die Sensorschicht 3b, elektrisch und thermisch mit der metallischen Kontaktierung 63 des Substrats 2
- 35

verbunden. Diese elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8,15 wird nun strukturiert. Dies kann z. B. durch Lithographie oder Ionenätzen geschehen. Somit kann ein elektrischer Pfad, welcher sich von der Membran 3 bis zur Metallisierung 63 erstreckt, vorhanden sein. Da durch die Vertiefung 67 in dem Substrat 2 eine zusätzliche Wegstrecke 62 für die gesamte Wegstrecke 61 hinzukommen kann, kann sich somit der thermische Widerstand des elektrischen Pfades vergrößern bzw. der thermische Leitwert des elektrischen Pfades kann sich verringern.

10 Beschrieben wurde somit in Fig. 9 ein Strahlungsdetektor mit einem Substrat 2 mit wiederum einer Vertiefung und mit einer Membran 3, wobei sich die Vertiefung in dem Substrat 2 in einer Richtung weg von der Membran 3 erstreckt. Der zumindest eine Abstandshalter zur Halterung der Membran 3 beabstandet von dem Substrat 2, zur elektrischen Kontaktierung der Membran 3 und zur thermischen Isolierung der Membran 3 bezüglich des
15 Substrats 2, erstreckt sich in die Vertiefung und ist somit bei gleichem Membran-zu-Substrat-Abstand länger als er ohne Vertiefung wäre, um einen größeren thermischen Widerstand zu besitzen. Das Substrat 2 kann eine integrierte Ausleseschaltung 6 aufweisen, die Schaltungselemente aufweist, die an einer der Membran abgewandten Seite des Substrats 2 gebildet sind, wie z.B. auf der Oberfläche, oder an der Oberfläche, geschützt
20 durch eine Passivierung oder dergleichen. Dabei kann eine Metallisierungsschicht 65 zur Kontaktierung der Schaltungselemente auf einer Höhe zwischen der der Membran 3 zugewandten Seite des Substrats 2 und dem Boden der Vertiefung des Substrats 2 angeordnet sein. Die elektrische Kontaktierungsschicht 65 verbindet oder verdrahtet die Schaltungselemente der Schaltung 6.

25 In anderen Worten können bei dieser Ausführungsform die Nanotubes nicht auf der obersten Metall-Lage des ROIC verankert werden, sondern mittels einer zusätzlichen Ätzung auf der untersten Metall-Lage des ROIC. Auf diese Weise kann die gesamte Dicke des Back-End-of-Line für die Länge der Nanotubes genutzt werden, was die thermische
30 Isolierung soweit verbessern kann.

Eine denkbare Ausführungsform zur Herstellung eines solchen versenkten Nanotube-Bolometers ist in den Figuren 9a bis 9e beispielhaft abgebildet.

Für alle oben beschriebenen Ausführungsbeispiele gilt, dass der zumindest eine erste
35 Abstandshalter 4, 14, 14n eine Wandrauigkeit oder Wandwelligkeit aufweisen kann, um einen Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder eine resultierende

Wegverlängerung zu erschweren. Dabei kann die Wandwelligkeit oder Wandrauigkeit durch Scallops erreicht werden. Die Wölbung der Amplitude w der Scallops kann dabei größer als 30 nm sein. Dabei kann die Amplitude der Wölbung der Scallops so ausgebildet sein, dass die resultierende Wegeverlängerung größer als 5 % oder 10 % oder 20 % ist.

Eine Wanddicke des zumindest einen Abstandshalters 4, 14, 14n kann in einem Bereich zwischen 0,1 nm und 1 μ m oder zwischen 1 nm und 0,5 μ m oder zwischen 10 nm und 100 nm liegen. Die jeweilige elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 8 des zumindest einen Abstandshalters 4, 14, 14n kann von einer Ätzenschutzschicht überzogen sein. Der Strahlungsdetektor 1 kann ein Bolometer sein.

7. Scallop-Nanotube-Bolometer

Das in Fig. 10a – 10d gezeigte Ausführungsbeispiel lehrt einen Strahlungsdetektor 1, bei welchem über einen Abstandshalter 4 bzw. eine erste Lage 15 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 eine Membran 3 mit der Metallisierung 2m des Substrats 2 verbindet. Das Substrat 2 kann wiederum eine integrierte Ausleseschaltung (Engl.: Read Out Integrated Circuit, kurz: ROIC) 6 beinhalten. Bei dieser Ausführungsform, welche prinzipiell mit den anderen Ausführungsformen kombiniert werden kann, weist der Abstandshalter 4, der in Fig. 10 d gezeigt ist, Scallops 4s auf. Diese weisen eine vorzugsweise mikroskopische, bogenförmige Ausgestaltung auf. Durch diese bogenförmige Ausgestaltung der Scallops 4s am Rand des Abstandshalters 4 kann Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung verringert oder reduziert werden. Dabei kann die resultierende Wegeverlängerung mehr als 5 % oder 10 % oder 20 % des direkten Abstands d zwischen Enden des zumindest einen Abstandshalters 4 betragen.

Eine Wölbung der Scallops kann zwischen 5 und 50 nm oder zwischen 10 und 35 nm oder zwischen 15 und 25 nm betragen. Alternativ kann eine Rauigkeit oder Welligkeit des zumindest einen Abstandshalters 4 bzw. die Wölbung der Scallops 4s eine Amplitude von größer als 30 nm aufweisen. Damit kann Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduziert werden. Die Scallops können dabei in einem Smooth-Sidewall-Prozess hergestellt werden. Somit verringert sich der thermische Leitwert des Abstandshalters 4 und damit auch der thermische Leitwert des elektrischen Pfades von der Membran 3 bis zur Metallisierung 2m des Sub-

strats 2. Das fertige Strahlungsmeter 1, welches in Fig. 10 d dargestellt ist, zeigt ein im Wesentlichen quaderförmiges Substrat 2. Auf diesem befindet sich eine Metallisierung 2m. Allerdings wurde die erste Opferschicht 9 noch nicht abgeätzt, was später noch erfolgen kann. Diese Metallisierung 2m kann elektrisch in Kontakt mit einer Membran 3 gebracht werden, welche sich aus einer optionalen Schutzschicht 3a und einer Sensorschicht 3b, welche darüber angeordnet ist, zusammensetzen kann. Die Kontaktierung kann über den genannten Abstandshalter 4 geschehen, welcher sich in Richtung der Normalen einer Oberfläche der Metallisierung 2m erstrecken kann und mittels einer ersten Lage 15 einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8, welche den ersten Abstandshalter 4 mit der Membran 3, insbesondere der Sensorschicht 3b, verbinden kann.

Prozesstechnisch kann ein solches Ausführungsbeispiel in einem Verfahren mit mehreren Schritten hergestellt werden. Der Ausgangspunkt kann in einem Substrat 2 bestehen, aus dem sich wie in Fig. 10 a gezeigt eine Metallisierung 2m befindet. Die möglichen Schritte werden nun erläutert.

- a) Aufbringen, beispielsweise durch Abscheidung, einer Opferschicht 9 auf die Metallisierung 2m des Substrats 3
- b) Aufbringen, insbesondere Abscheiden, einer Membran 3 auf die Opferschicht 9. Dabei kann auf die beispielsweise plane Oberfläche der Opferschicht 9, zumindest in einem Bereich der beispielsweise planen Oberfläche, eine optionale Schutzschicht 3a aufgebracht, insbesondere abgeschieden werden. Dies kann vorzugsweise durch ALD oder CVD geschehen. Auf die optionale Schutzschicht 3a wird im Rahmen des Aufbringens der Membran 3 eine Sensorschicht 3b aufgebracht. Dies kann durch Abscheiden geschehen. Insbesondere erfolgt das Aufbringen bzw. Abscheiden auf die optionale Schutzschicht 3b und geschieht vorzugsweise mittels ALD oder CVD. Damit ist die Sensorschicht 3b die Schicht, welche am weitesten von der Metallisierung 2m und dem Substrat 2 entfernt ist. Die optionale Schutzschicht 3b und die Sensorschicht 3a können in diesem Prozessschritt auch strukturiert werden.
- c) In diesem Schritt wird die erste Opferschicht 9 strukturiert. Dies kann durch Ätzens eines Lochs 7 in die erste Opferschicht 9 geschehen. Dies geschieht an der Stelle, an der die Metallisierung 2m elektrisch und mechanisch über eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht 15 bzw. den Abstandshalter 4 kontak-

tiert werden soll. Beispielsweise kann die Strukturierung der ersten Opferschicht 9 mittels eines DRIE- (insbesondere eines Bosch- oder Gyro-) Prozess erfolgen. Dabei wird der Ätzprozess so abgewandelt, dass sich am Rand des normalerweise im Wesentlichen zylindrischen Loches 7 Scallops bilden. Als Scallops werden vorzugsweise mikroskopische, bogenförmige Wände bezeichnet. Dies dient dazu den Transport der Phononen durch Oberflächen-Streueffekte sowie durch die resultierende Wegverlängerung signifikant zu beeinflussen. Hierdurch kann ein kleiner thermischer Leitwert erreicht werden. Es sind also in dem fertigen Loch 7 in axialer Richtung hintereinander gereihte bogenförmige Ringe des im Wesentlichen zylindrischen Loches 7 vorhanden. Diese können hergestellt werden, indem relativ lange in einem konventionellen Bosch-Ätzprozess chemisch geätzt wird, so dass durch die ungerichtete Ätzrichtung am Rand des Loches 7 sich die vorzugsweise mikroskopischen, bogenförmigen Ringe ausbilden können. Wenn man nun die Ätzdauer eines konventionellen Bosch-Prozesses in den einzelnen Schritten im Vergleich zu dem konventionellen Bosch-Prozess deutlich erhöht und solche Ätzvorgänge mehrfach wiederholt, kann sich ein im Wesentlichen zylindrisches Loch 7 ausbilden, welches an den Wänden sogenannte Scallops 4s aufweisen kann. Alternativ kann ein solches Loch 7, dessen Wände Scallops 4s aufweisen, erzeugt werden, indem ein Bosch-Prozess modifiziert wird, indem zuerst in die Normalenrichtung der Metallisierung 2m durch Ionenätzen geätzt wird. Damit kann man in eine gewisse Tiefe gelangen (ca. $\frac{1}{4}$ – $\frac{3}{4}$ der Länge eines Bogens). Nun kann wieder chemisch geätzt werden, um durch das chemische Ätzen die bogenförmige Struktur am Rand des bisher geätzten Loches 7 herstellen zu können. Diese beiden Schritte können nun wiederholt werden, so dass sich ein makroskopisch im Wesentlichen zylindrisches Loch 7 ausbilden kann, welches von der äußeren Oberfläche, welche von der Metallisierung 2m auf der entfernten Seite angeordnet sein kann, bis zur Metallisierung 2m des Substrats 2 erstrecken kann. Da in dieser Variante zusätzlich durch das Ionenätzen sichergestellt werden kann, dass bei einem erneuten Ätzen der alte, d. h. bisher geätzte Bogen, nicht noch einmal chemisch nachgeätzt wird, können klarere Übergänge zwischen den einzelnen Bögen in die Normalenrichtung der Metallisierung 2m erreicht werden.

- d) Im diesem Prozessschritt geschieht das Aufbringen, insbesondere durch Abscheidung, und die Strukturierung der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8. Eine erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8

wird abgeschieden. Diese kann die Membran 3, insbesondere die Sensorschicht 3b der Membran 3, elektrisch und thermisch mit der Metallisierung 2m verbinden. Dabei erstreckt sich die erste Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 zumindest teilweise über die nach außen gewandte Oberfläche der ersten Opferschicht 9 und über die zylindrische Wand des Loches 7. Die Abscheidung kann vorzugsweise mittels ALD geschehen, so dass die Wände des Loches 7 inklusive der Bögen, welche die Scallops 4s bilden, mit dem abgeschiedenen Metall der ersten Lage 15 der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 beschichtet sein können. Somit bildet sich die vorzugsweise mikroskopische Seitenwandrauigkeit aus. Hierdurch wird Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte sowie durch die resultierende Wegverlängerung reduziert. Die Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 an der Oberfläche der Opferschicht 9, 10, welche von der Metallisierung 2m entfernt ist, kann so strukturiert werden, dass sich nur ein schmaler elektrischer Pfad ausbildet. Damit kann der thermische Leitwert des elektrischen Pfades von der Sensorschicht 3b bis zum Abstandshalter 4 gemäß Gleichung 4 gering gehalten werden. Durch eine geringe Breite einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht 8 kann ein kleiner thermischer Leitwert erreicht werden.

Als Endergebnis resultiert also ein Abstandshalter 4 wie er in Fig. 10d gezeigt ist. Dabei haben Scallops 4s (wie in der Vergrößerung gezeigt) eine Länge p entlang der Richtung zwischen Membran und Substrat und eine Amplitude w der Wölbungen der Scallops gemessen in lateraler Richtung. Je größer der Quotient w/p ist, umso größer ist die resultierende Wegverlängerung des thermischen und elektrischen Weges, den das leitfähige Material in der Schnittfläche senkrecht zum Substrat definiert. Anders ausgedrückt erhöht sich die Länge, entlang der die Wand des Abstandshalters die Querschnittsfläche schneidet, relativ zu dem direkten Membran-zu-Substrat-Abstand d umso mehr, je höher w/p ist. Erfindungsgemäß kann der Quotient w/p so gewählt und durch entsprechendes implementieren von beispielsweise dem Bosch-Prozess eingestellt werden, dass die resultierende Wegverlängerung größer als 5 % oder 10% oder 20 % ist. Anders ausgedrückt manifestiert sich in der elektrisch leitfähigen Schicht in der Wand des Abstandshalters durch die konforme Abscheidung mittels beispielsweise ALD die Rauigkeit in der Wand des Loches der Opferschicht, wie sie durch beispielsweise den Boschprozess hervorgerufen worden ist, in einer entsprechenden Welligkeit, die zu der beschriebenen Wegverlängerung führt – den Scallops.

Dieses Ausführungsbeispiel, bei welchem durch die Scallops 4s ein geringerer thermischer Leitwert des Abstandshalters 4 erreicht werden kann, ist mit sämtlichen anderen Ausführungsbeispielen kombinierbar.

- 5 In anderen Worten kann bei dieser Ausführungsform eines Scallop-Nanotube-Bolometers der verwendete Bosch-Prozess zur Ätzung der Opferschicht derart variiert werden, dass die prozessbedingten "Scallops" die Seitenwandrauigkeit deutlich erhöhen. In diesem Fall wird der Transport der Phononen durch Oberflächenstreuungseffekte signifikant beeinflusst, wodurch ein kleinerer thermischer Leitwert erzielt werden kann. Zudem wird die effektive
10 Nanotube-Länge vergrößert, was den thermischen Leitwert weiter minimiert.

Eine denkbare Ausführungsform zur Herstellung eines solchen Scallop-Nanotube-Bolometers wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Figuren 10a bis 10d beispielhaft beschrieben:

15

- (Fig. 10a) Abscheidung der Opferschicht
- (Fig. 10b) Abscheidung und Strukturierung eines Schutzoxides sowie einer Sensorschicht
- (Fig. 10c) Strukturierung der Opferschicht (z.B. mittels des Bosch-Prozesses)
20
- (Fig. 10d) Abscheidung und Strukturierung einer elektrisch leitenden Schicht

- Zusammenfassend sind sämtliche Aspekte, Ausführungsbeispiele, Weiterbildungen und
25 Merkmale, soweit technisch sinnvoll, miteinander kombinierbar. Es ist z. B. denkbar, dass Scallops 4s auch in den in Fig. 4 a-d, 5 a-f, 6 a-g, 7 a-j, 8 a-d und 9 a-e gezeigten Ausführungsbeispielen ausgebildet werden. Insbesondere ist denkbar, dass die einzelnen Lagen der ineinander geschachtelten Zylinder in den Ausführungsbeispielen, welche in Fig. 7 a-j oder 8 a-d dargestellt sind, mit Scallops 4s ausgebildet werden. Dies ist zumindest bei der
30 ersten Lage 15 der Metallisierung in Fig. 7 a-j und 8 a-d möglich. In Fig. 4 a-d ist dies sowohl in dem ersten Abschnitt 4a als auch in dem zweiten Abschnitt 4b des Abstandshalters 4 möglich. In den Fig. 5 a-f und 6 a-g ist eine Ausgestaltung mit Scallops 4s bei sämtlichen Abstandshaltern möglich. Bei dem in Fig. 9 a-e dargestellten Ausführungsbeispiel

ist es bei dem Abstandshalter 4 auch möglich, diesen mit bogenförmigen Scallops auszugestalten. Auch ist eine Kombination mit einem in das Substrat hinein vertieften Abstandshalter, wie in Fig. 9 a-e dargestellt, mit den anderen Ausführungsbeispielen von Fig. 4 a-d bis Fig. 8 a-d und Fig. 10 a-d möglich.

5

Sämtliche Aspekte, Ausführungsformen, Varianten und Weiterbildungen sind erfindungsgemäß auch möglich mit einer Membran 3, welche lediglich eine Sensorschicht 3b umfasst, aber keine Schutzschicht 3a.

10 Die Erfindung kann ferner in Form der folgenden Ausführungsformen realisiert sein:

1. Strahlungsdetektor (1) aufweisend:

- ein Substrat (2) und eine Membran (3),
- zumindest einen Abstandshalter (4) zur Halterung der Membran (3) beabstandet

15

von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

wobei in einer Richtung zwischen Substrat (2) und Membran (3) der zumindest eine Abstandshalter (4) in einen ersten Abschnitt (4a) und einen zweiten Abschnitt (4b) gegliedert ist, deren Länge jeweils weniger als einen Abstand zwischen Sub-

20

strat (2) und Membran (3) überbrückt,

wobei der erste und zweite Abschnitt (4a, 4b) lateral zueinander versetzt und über ein lateral verlaufendes Element (5) verbunden sind, so dass der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) über das lateral verlaufende Element (5) elektrisch in Reihe geschaltet sind,

25

und wobei das lateral verlaufende Element (5) weniger oder gleich zu einem thermischen Widerstand des zumindest einen Abstandshalters (4) beiträgt bei als eine Summe der thermischen Widerstände des ersten und zweiten Abschnitts (4a, 4b).

2. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 1, wobei ein Querschnitt elektrisch und thermisch leitfähigen Materials (8) des ersten und zweiten Abschnitts (4a, 4b) kleiner oder gleich als $7\ \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $3\ \mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $0,8\ \mu\text{m}^2$ ist.

30

3. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 1 oder 2, wobei das lateral verlaufende Element (5) mehr als 25% des Abstands oder mehr als 30 % des Abstands oder mehr als 45 % des Abstands von sowohl dem Substrat (2) als auch der Membran (3)

35

entfernt oder im Wesentlichen mittig zwischen Substrat (2) und Membran (3) angeordnet ist, oder wobei das lateral verlaufende Element (5) zwischen der Membran (3) und dem Substrat (2) in einem Abstand zwischen 1 und 2,5 μm von der Membran (3) und/oder von dem Substrat mehr als 2,5 μm entfernt angeordnet ist.

5

4. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei das lateral verlaufende Element (5) als Reflektor (5a) für einfallende elektromagnetische Strahlung ausgebildet ist.

10

5. Strahlungsdetektor (1) aufweisend

- ein Substrat (2) und eine Membran (3),
- zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

15

wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) aufweist, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat (2) schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter (14) erstreckt, so dass ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter (14), über den die Membran (3) kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat (2) und Membran (3) ist.

20

6. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 5, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen gebildet ist, die paarweise an ihren oberen Enden oder unteren Enden verbunden sind, wobei zumindest zwei Säulen über ein lateral verlaufendes Element (5) an ihrem oberen oder unteren Ende verbunden sind.

25

7. Strahlungsdetektor gemäß Ausführungsform 6, wobei das lateral verlaufende Element (5), zwischen 10 % und 50 % oder zwischen 20 und 40 % oder zwischen 25 und 30 % des Abstandes zwischen Membran (3) und Substrat (2) vom Substrat (2) entfernt angeordnet ist, oder wobei das lateral verlaufende Element (5) zwischen der Membran (3) und dem Substrat (2) in einem Abstand zwischen 1 und 2,5 μm von der Membran (3) und/oder von dem Substrat mehr als 2,5 μm entfernt angeordnet ist.

30

8. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ausführungsformen 6 oder 7, wobei das lateral verlaufende Element (5) sich zumindest teilweise unter der Membran (3) erstreckt, um einen Reflektor zu bilden.
- 5 9. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 6, wobei das lateral verlaufende Element (5) gleich oder weiter von dem Substrat (2) beabstandet ist als die Membran (3).
10. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ausführungsformen 2 bis 4 oder 6 bis 9, wobei das lateral verlaufende Element (5) als Steg ausgebildet ist, dessen Länge mindestens das 2-fache seiner Breite oder mehr als das 5- oder 10- oder 20-fache der Breite beträgt.
- 10 11. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 5, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) als eine Säule ausgebildet ist, in deren Wand die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet angeordnet ist.
- 15 12. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 11, wobei in der Wand der Säule (45) die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet so angeordnet ist, dass in einer Schnittfläche, die längs und durch die Säule verläuft, die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht zwei Schleifen bildet.
- 20 13. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 11, wobei in einem Querschnitt der Säule (45) die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) zumindest drei Ringe (45r) bildet und Zwischenräume (45zw) zwischen den Ringen (45r) zu Hohlräumen gehören, die an einem dem Substrat (2) abgewandten Ende zumindest teilweise geöffnet sind.
- 25 14. Strahlungsdetektor (1), aufweisend:
-ein Substrat (2) mit einer Vertiefung,
30 -eine Membran (3),
wobei sich die Vertiefung in dem Substrat (2) in einer Richtung weg von der Membran (3) erstreckt,
-und zumindest einen Abstandshalter (4, 14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur
35 thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14) sich in die Vertiefung erstreckt.

15. Strahlungsdetektor gemäß Ausführungsform 14, wobei das Substrat (2) eine integrierte Ausleseschaltung (6) aufweist, die Schaltungselemente aufweist, die an einer der Membran abgewandten Seite des Substrats (2) gebildet sind, wobei eine Metallisierungsschicht (65) zur elektrischen Verbindung der Schaltungselemente miteinander auf einer Höhe zwischen der der Membran (3) zugewandten Seite des Substrats (2) und dem Boden der Vertiefung des Substrats (2) angeordnet ist.

16. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14, 14n) eine Rauigkeit oder Welligkeit mit einer Amplitude von größer als 30 nm aufweist, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

17. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei eine Wanddicke des zumindest einen Abstandshalters (4, 14, 14n) in einem Bereich zwischen 0,1 nm und 1 µm oder zwischen 1 nm und 0,5 µm oder zwischen 10 nm und 100 nm liegt.

18. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) des zumindest einen Abstandshalters von einer Ätzenschutzschicht überzogen ist.

19. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ausführungsformen, wobei der Strahlungsdetektor (1) ein Bolometer ist.

20. Strahlungsdetektor (1) aufweisend:

- ein Substrat (2) und eine Membran (3),
- zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14, 14n) eine Rauigkeit und/oder Welligkeit mit einer Amplitude (w) von größer als 30 nm aufweist, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch die resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

21. Strahlungsdetektor (1) gemäß Ausführungsform 20, wobei die Wandrauigkeit oder Wandwelligkeit durch Scallops erreicht wird.
- 5 22. Strahlungsdetektor gemäß Ausführungsform 21, wobei eine Amplitude der Wölbung der Scallops größer als 30 nm ist.
23. Strahlungsdetektor gemäß Ausführungsform 21 oder 22, wobei eine Amplitude der Wölbung der Scallops so ausgebildet ist, dass die resultierende Wegverlängerung
10 größer als 5 % oder 10 % oder 20 % ist.
24. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ausführungsformen 1 bis 4, wobei der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) jeweils mittels ALD in Öffnungen einer ersten und/oder zweiten Opferschicht (9, 10) hergestellt werden.
15
25. Verfahren gemäß Ausführungsform 24, wobei der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) durch Ätzen eines Lochs (7) in die erste und/oder zweite Opferschicht (9, 10) hergestellt werden, wobei das Ätzen mittels eines DRIE-Prozess geschieht, wobei als
20 DRIE-Prozess ein Bosch- und/oder Kyroprozess genutzt wird, so dass in der ersten und/oder zweiten Opferschicht (9, 10) Scallops ausgebildet werden.
26. Verfahren gemäß Ausführungsform 24 oder 25, aufweisend folgende Verfahrensschritte:
- 25 -Strukturierung einer ersten Opferschicht (9) umfassend das Ätzen eines Lochs (7)
-Abscheiden einer ersten Lage an leitfähigem Material zur Erzeugung einer ersten leitfähigen Schicht (15),
-Strukturierung der ersten Lage an leitfähigem Material zur Erzeugung einer ersten leitfähigen Schicht (15) zur Erzeugung des lateral verlaufenden Elements (5),
30 -Abscheiden einer zweiten Opferschicht (10),
-Ätzen eines Lochs (7) in die zweite Opferschicht (10) für einen Zugang zum lateral verlaufenden Element (5),
-Abscheiden einer zweiten Lage an leitfähigem Material zur Erzeugung einer zweiten leitfähigen Schicht (25),
35 -Strukturierung der zweiten Lage an leitfähigem Material

27. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 5-13, wobei die elektrisch und thermisch leitfähige, schleifenförmige Schicht (8) durch den ersten Abstandhalter (14) mittels ALD und einem Opferschichtverfahren hergestellt wird, wobei eine erste und zumindest eine zweite Opferschicht (9, 10, 11) abgeschieden werden, mit welchen die Form der schleifenförmigen elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) erzeugt wird.
28. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Ausführungsform 27, wobei die erste und/oder zumindest eine zweite Opferschicht (9, 10) strukturiert werden durch Ätzen mindestens eines Lochs (7) in die erste und/oder zumindest eine zweite Opferschicht (9, 10, 11), so dass eine erste, zweite und/oder dritte Lage (15, 25, 35) der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (8) abgeschieden werden kann.
29. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Ausführungsform 27 oder 28, wobei die erste und/oder zumindest eine weitere, zweite Opferschicht (9, 10, 11) durch ALD abgeschieden wird.
30. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 27-29, wobei die erste und/oder zumindest eine weitere zweite Opferschicht (9, 10, 11) mittels eines Boschprozesses strukturiert werden und/oder dass die Abscheidung der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (8) mittels Atomic Layer Deposition, Chemical Vapor Deposition und/oder Physical Vapor Deposition geschieht.
31. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 27-30, wobei zur elektrischen Kontaktierung des Substrats (2) der mindestens eine erste Abstandhalter (14) abgeschieden wird, welcher sich aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen zusammensetzt, die paarweise an ihren oberen Enden oder unteren Enden verbunden sind, wobei zumindest zwei Säulen des mindestens einen Abstandshalters (14) über ein lateral verlaufendes Element (5) nach unten beim Abscheiden begrenzt werden.
32. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 27-31, wobei die Membran (3) durch zumindest eines der lateral verlauf-

fenden Elemente (5) elektrisch kontaktiert wird durch Abscheiden einer ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) auf die erste Opferschicht (9).

33. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ausführungsformen 27-32, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) in einem mehrstufigen Opferschichtverfahren erzeugt wird, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) als Säule abgeschieden wird bei der in dem mehrstufigen Verfahren an einer Wand der Säule die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet abgeschieden wird.

34. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Ausführungsform 33, aufweisend:

- Abscheiden einer ersten Opferschicht (9) auf dem Substrat (2),
- Ätzen von mindestens einem Loch (7) in die erste Opferschicht (9),
- Abscheidung einer ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) zur Herstellung des ersten Rings (45r) des ersten Abstandshalters (14) und anschließende Abscheidung der zweiten Opferschicht (10),
- Abscheidung einer zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) zur Herstellung des zweiten Rings (45r) der Säule (45),
- Abscheidung einer weiteren, zweiten Opferschicht (11),
- Abscheiden einer dritten Lage elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35), und
- Strukturierung der dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35).

35. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Ausführungsform 34, aufweisend:

vor, nach oder während der Strukturierung der dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35) ein Entfernen der dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35) im Lochboden erfolgt, so dass sich in besagter Schnittfläche auf einer Seite einer Achse (z) des ersten Abstandshalters (14) der elektrische Pfad bilden kann.

36. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 34 oder 35, wobei das Entfernen der zweiten und/oder dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25, 35) im Lochboden durch Ionenätzen geschieht.

37. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Ausführungsform 34, wobei die zweite Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) in einem zusätzlichen Schritt, welcher direkt nach dem Abscheiden erfolgt, selektiv strukturiert wird, z.B. mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen, wobei die zylinderförmige Symmetrie der Struktur gebrochen wird, indem lediglich ein Teil der zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) beim Strukturieren entfernt wird.
38. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 34-37, wobei nach dem Abscheiden der ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) und Abscheiden der zweiten Opferschicht (10), aber vor dem Abscheiden der zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25), ein chemisch mechanisches Polieren der Oberfläche des Strahlungsdetektors (1) geschieht.
39. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 25-38, wobei die Strukturierung der Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15, 25, 35) mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen geschieht.
40. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) nach einem der Ausführungsformen 25-39, wobei nach dem Abscheiden der ersten, zweiten oder weiteren, zweiten Opferschicht (9,10, 11) eine, vorzugsweise in Reihenfolge, Schutz- und/oder Sensorschicht (3a, 3b), welche die Membran (3) bilden, abgeschieden werden.
41. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 14 bis 23, wobei eine elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (8), welche den zumindest einen Abstandshalter (14) bildet, bis zu der oder in die Vertiefung abgeschieden wird.
42. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem der Ausführungsformen 20 bis 23, wobei während der Herstellung Löcher (7) für die Abscheidung von

Abstandshaltern (14) so in eine Opferschicht (9) auf dem Substrat (2) geätzt werden, so dass die Abstandshalter (14) nach dem Abscheiden in die Löcher (7) eine Wandrauigkeit oder Welligkeit aufweisen um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

5

43. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ausführungsformen 21 bis 42, wobei auf den zumindest einen Abstandshalter (14) und/oder die einzelnen Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15, 25, 35) eine Ätzenschutzschicht abgeschieden wird.

10

Patentansprüche

1. Strahlungsdetektor (1) aufweisend

- ein Substrat (2) und eine Membran (3)

5 - zumindest einen als Nanotube ausgeführten Abstandshalter (4) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

10 wobei in einer Richtung zwischen Substrat (2) und Membran (3) der als Nanotube ausgeführte Abstandshalter (4) in einen ersten Abschnitt (4a) und einen zweiten Abschnitt (4b) gegliedert ist, deren Länge jeweils weniger als einen Abstand zwischen Substrat (2) und Membran (3) überbrückt,

15 wobei der erste und zweite Abschnitt (4a, 4b) lateral zueinander versetzt und über ein lateral verlaufendes Element (5) verbunden sind, so dass der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) über das lateral verlaufende Element (5) elektrisch in Reihe geschaltet sind, und

20 wobei das lateral verlaufende Element (5) weniger oder gleich zu einem thermischen Widerstand des als Nanotube ausgeführten Abstandshalters (4) beiträgt als eine Summe der thermischen Widerstände des ersten und zweiten Abschnitts (4a, 4b).

25 2. Strahlungsdetektor (1) gemäß Anspruch 1, wobei ein Querschnitt elektrisch und thermisch leitfähigen Materials (8) des ersten und zweiten Abschnitts (4a, 4b) kleiner oder gleich als $7\text{ }\mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $3\text{ }\mu\text{m}^2$ oder kleiner oder gleich als $0,8\text{ }\mu\text{m}^2$ ist.

30 3. Strahlungsdetektor (1) gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei das lateral verlaufende Element (5) mehr als 25% des Abstands oder mehr als 30 % des Abstands oder mehr als 45 % des Abstands von sowohl dem Substrat (2) als auch der Membran (3) entfernt oder im Wesentlichen mittig zwischen Substrat (2) und Membran (3) angeordnet ist, oder wobei das lateral verlaufende Element (5) zwischen der Membran (3) und dem Substrat (2) in einem Abstand zwischen 1 und $2,5\text{ }\mu\text{m}$ von der Membran (3) und/oder von dem Substrat mehr als $2,5\text{ }\mu\text{m}$ entfernt angeordnet ist.

4. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das lateral verlaufende Element (5) als Reflektor (5a) für einfallende elektromagnetische Strahlung ausgebildet ist.
- 5 5. Strahlungsdetektor (1) aufweisend
- ein Substrat (2) und eine Membran (3)
 - zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),
- 10 wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) aufweist, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat (2) schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter (14) erstreckt, so dass ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter (14), über den die Membran (3) kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat (2) und Membran (3)
- 15 ist, wobei der Abstandshalter (14) aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen (14z) gebildet ist, die paarweise an ihren dem Substrat (2) zugewandten unteren Enden verbunden sind, wobei zumindest zwei Säulen (14z) über ein lateral verlaufendes Element (5) an ihrem dem Substrat (2) zugewandten unteren Ende verbunden sind.
- 20 6. Strahlungsdetektor (1) nach Anspruch 5, wobei der Abstandshalter (14) ferner einen durchgehenden Abstandshalterabschnitt (14d) aufweist, der sich durchgehend zwischen der Membran (3) und dem Substrat (2) erstreckt.
7. Strahlungsdetektor nach Anspruch 5 oder 6, wobei ein Ende einer Struktur (5, 14z)
- 25 bestehend aus den zwei Abstandshalterabschnitten (14z) und dem lateralen Element (5) mit der Membran (3) verbunden ist, und wobei das andere Ende dieser Struktur (5, 14z) mit dem durchgehenden Abstandshalterabschnitt (14d) verbunden ist.
8. Strahlungsdetektor (1) nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei die Abstandshalterabschnitte (14z) und der durchgehende Abstandshalterabschnitt (14d) als Nanotubes ausgeführt sind.
- 30
9. Strahlungsdetektor gemäß einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei das lateral verlaufende Element (5), zwischen 10 % und 50 % oder zwischen 20 und 40 % oder zwischen
- 35 25 und 30 % des Abstandes zwischen Membran (3) und Substrat (2) vom Substrat (2)

entfernt angeordnet ist, oder wobei das lateral verlaufende Element (5) zwischen der Membran (3) und dem Substrat (2) in einem Abstand zwischen 1 und 2,5 μm von der Membran (3) und/oder von dem Substrat mehr als 2,5 μm entfernt angeordnet ist.

- 5 10. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 9, wobei das lateral verlaufende Element (5) sich zumindest teilweise unter der Membran (3) erstreckt, um einen Reflektor zu bilden.
11. Strahlungsdetektor (1) aufweisend
- 10 - ein Substrat (2) und eine Membran (3)
- zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),
- 15 wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) aufweist, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat (2) schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter (14) erstreckt, so dass ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter (14), über den die Membran (3) kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat (2) und Membran (3) ist,
- 20 wobei der Abstandshalter (14) aus einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen (14z) gebildet ist, die paarweise an ihren dem Substrat (2) zugewandten unteren Enden verbunden sind, wobei zumindest zwei Säulen (14z) über ein lateral verlaufendes Element (5) an ihrem dem Substrat (2) zugewandten unteren Ende verbunden sind, und wobei das lateral verlaufende Element (5) gleich weit oder
- 25 weiter von dem Substrat (2) beabstandet ist als die Membran (3).
12. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der Ansprüche 2 bis 11, wobei das lateral verlaufende Element (5) als Steg ausgebildet ist, dessen Länge mindestens das 2-
- 30 fache seiner Breite oder mehr als das 5- oder 10- oder 20-fache der Breite beträgt.
13. Strahlungsdetektor (1) aufweisend

- ein Substrat (2) und eine Membran (3)
- zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

5 wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) aufweist, die sich in einer Schnittfläche senkrecht zum Substrat (2) schleifenförmig durch den zumindest einen Abstandshalter (14) erstreckt, so dass ein elektrischer Pfad durch den zumindest einen Abstandshalter (14), über den die Membran (3) kontaktiert ist, länger als ein Abstand zwischen Substrat (2) und Membran (3) ist, und wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) als eine
10 Säule ausgebildet ist, in deren Wand die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet angeordnet ist.

14. Strahlungsdetektor (1) gemäß Anspruch 13, wobei in der Wand der Säule (45) die
15 elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet so angeordnet ist, dass in einer Schnittfläche, die längs und durch die Säule verläuft, die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht zwei Schleifen bildet.

15. Strahlungsdetektor (1) gemäß Anspruch 13, wobei in einem Querschnitt der Säule
20 (45) die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) zumindest drei Ringe (45r) bildet und Zwischenräume (45zw) zwischen den Ringen (45r) zu Hohlräumen gehören, die an einem dem Substrat (2) abgewandten Ende zumindest teilweise geöffnet sind.

25 16. Strahlungsdetektor (1), aufweisend

- ein Substrat (2) mit einer Vertiefung
- eine Membran (3),

 wobei sich die Vertiefung in dem Substrat (2) in einer Richtung weg von der Membran (3) erstreckt

30 - und zumindest einen Abstandshalter (4, 14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2), wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14) sich in die Vertiefung erstreckt, und

wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14, 14n) eine Rauigkeit oder Welligkeit mit einer Amplitude von größer als 30 nm aufweist, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

5

17. Strahlungsdetektor gemäß Anspruch 16, wobei das Substrat (2) eine integrierte Ausleseschaltung (6) aufweist, die Schaltungselemente aufweist, die an einer der Membran abgewandten Seite des Substrats (2) gebildet sind, wobei eine Metallisierungsschicht (65) zur elektrischen Verbindung der Schaltungselemente miteinander auf einer Höhe zwischen der der Membran (3) zugewandten Seite des Substrats (2) und dem Boden der Vertiefung des Substrats (2) angeordnet ist.

10

18. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Wanddicke des zumindest einen Abstandshalters (4, 14, 14n) in einem Bereich zwischen 0,1 nm und 1 µm oder zwischen 1 nm und 0,5 µm oder zwischen 10 nm und 100 nm liegt.

15

19. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) des zumindest einen Abstandshalters von einer Ätزشchutzschicht überzogen ist.

20

20. Strahlungsdetektor (1) gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Strahlungsdetektor (1) ein Bolometer ist.

25 21. Strahlungsdetektor (1) aufweisend

- ein Substrat (2) und eine Membran (3)
- zumindest einen Abstandshalter (14) zur Halterung der Membran (3) beabstandet von dem Substrat (2), zur elektrischen Kontaktierung der Membran (3) und zur thermischen Isolierung der Membran (3) bezüglich des Substrats (2),

30

wobei der zumindest eine Abstandshalter (4, 14, 14n) eine Rauigkeit und/oder Welligkeit mit einer Amplitude (w) von größer als 30 nm aufweist, um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch die resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

22. Strahlungsdetektor (1) gemäß Anspruch 21, wobei die Wandrauigkeit oder Wandwelligkeit durch Scallops erreicht wird.
- 5 23. Strahlungsdetektor gemäß Anspruch 22, wobei eine Amplitude der Wölbung der Scallops größer als 30 nm ist.
- 10 24. Strahlungsdetektor gemäß Anspruch 22 oder 23, wobei eine Amplitude der Wölbung der Scallops so ausgebildet ist, dass die resultierende Wegverlängerung größer als 5 % oder 10 % oder 20 % ist.
- 15 25. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) jeweils mittels ALD in Öffnungen einer ersten und/oder zweiten Opferschicht (9, 10) hergestellt werden.
- 20 26. Verfahren gemäß Anspruch 25, wobei der erste und der zweite Abschnitt (4a, 4b) durch Ätzen eines Lochs (7) in die erste und/oder zweite Opferschicht (9, 10) hergestellt werden, wobei das Ätzen mittels eines DRIE-Prozess geschieht, wobei als DRIE-Prozess ein Bosch- und/oder Kyroprozess genutzt wird, so dass in der ersten und/oder zweiten Opferschicht (9, 10) Scallops ausgebildet werden.
- 25 27. Verfahren gemäß Anspruch 25 oder 26, aufweisend folgende Verfahrensschritte:
- Strukturieren einer ersten Opferschicht (9) umfassend das Ätzen eines Lochs (7),
 - Abscheiden einer ersten Lage leitfähigen Materials zum Erzeugen einer ersten leitfähigen Schicht (15) und zum Ausbilden des ersten Abschnitts (4a) des als Nanotube ausgeführten Abstandshalters (4),
 - Strukturieren der ersten Lage des leitfähigen Materials zum Erzeugen einer ersten leitfähigen Schicht (15) zum Erzeugen des lateral verlaufenden Elements (5),
 - 30 - Abscheiden einer zweiten Opferschicht (10),
 - Ätzen eines Lochs (7) in die zweite Opferschicht (10) für einen Zugang zum lateral verlaufenden Element (5),
 - Abscheiden einer zweiten Lage leitfähigen Materials zum Erzeugen einer zweiten leitfähigen Schicht (25) und zum Ausbilden eines zweiten Abschnitts (4b) des als

Nanotube ausgeführten Abstandshalters (4),
- Strukturieren der zweiten Lage des leitfähigen Materials.

- 5 28. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 5 bis 15, wobei die elektrisch und thermisch leitfähige, schleifenförmige Schicht (8) durch den ersten Abstandhalter (14) mittels ALD und einem Opfer-
schichtverfahren hergestellt wird, wobei eine erste und zumindest eine zweite Opfer-
schicht (9, 10, 11) abgeschieden werden, mit welchen die Form der schleifen-
förmigen elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) erzeugt wird.
- 10 29. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Anspruch 28, wo-
bei die erste und/oder zumindest eine zweite Opferschicht (9, 10) strukturiert wer-
den durch Ätzen mindestens eines Lochs (7) in die erste und/oder zumindest eine
zweite Opferschicht (9, 10, 11), so dass eine erste, zweite und/oder dritte Lage
15 (15, 25, 35) der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (8) abgeschieden
werden kann.
30. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Anspruch 28 oder
29, wobei die erste und/oder zumindest eine weitere, zweite Opferschicht (9, 10,
20 11) durch ALD abgeschieden wird.
31. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der An-
sprüche 28 bis 30, wobei die erste und/oder zumindest eine weitere zweite Opfer-
schicht (9, 10, 11) mittels eines Boschprozesses strukturiert werden und/oder dass
25 die Abscheidung der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (8) mittels Atomic
Layer Deposition, Chemical Vapor Deposition und/oder Physical Vapor Deposition
geschieht.
- 30 32. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der An-
sprüche 28 bis 31, wobei zur elektrischen Kontaktierung des Substrats (2) der
mindestens eine erste Abstandhalter (14) abgeschieden wird, welcher sich aus
einer Reihe von lateral beabstandeten Säulen zusammensetzt, die paarweise an
ihren dem Substrat (2) zugewandten unteren Enden verbunden sind, wobei zu-

mindest zwei Säulen des mindestens einen Abstandshalters (14) über ein lateral verlaufendes Element (5) nach unten beim Abscheiden begrenzt werden.

- 5 33. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 28 bis 32, wobei die Membran (3) durch zumindest eines der lateral verlaufenden Elemente (5) elektrisch kontaktiert wird durch Abscheiden einer ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) auf die erste Opferschicht (9).
- 10 34. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 28 bis 33, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) in einem mehrstufigen Opferschichtverfahren erzeugt wird, wobei der zumindest eine Abstandshalter (14) als Säule abgeschieden wird bei der in dem mehrstufigen Verfahren an einer Wand der Säule die elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8) gefaltet abgeschieden wird.
- 15 35. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Anspruch 34, aufweisend
- Abscheiden einer ersten Opferschicht (9) auf dem Substrat (2),
 - 20 - Ätzen von mindestens einem Loch (7) in die erste Opferschicht (9),
 - Abscheiden einer ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) zur Herstellung des ersten Rings (45r) des ersten Abstandshalters (14) und anschließendes Abscheiden der zweiten Opferschicht (10)
 - Abscheiden einer zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) zur Herstellung des zweiten Rings (45r) der Säule (45)
 - 25 - Abscheiden einer weiteren, zweiten Opferschicht (11)
 - Abscheiden einer dritten Lage einer elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35)
 - Strukturieren der dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35).
 - 30
36. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Anspruch 35, aufweisend
- vor, nach oder während der Strukturierung der dritten Lage der elektrisch

und thermisch leitfähigen Schicht (35) ein Entfernen der dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (35) im Lochboden, so dass sich in besagter Schnittfläche auf einer Seite einer Achse (z) des ersten Abstandshalters (14) der elektrische Pfad bilden kann.

5

37. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 35 oder 36, wobei das Entfernen der zweiten und/oder dritten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25, 35) im Lochboden durch Ionenätzen geschieht.

10

38. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß Anspruch 35, wobei die zweite Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) in einem zusätzlichen Schritt, welcher direkt nach dem Abscheiden erfolgt, selektiv strukturiert wird, z.B. mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen, wobei die zylinderförmige Symmetrie der Struktur gebrochen wird, indem lediglich ein Teil der zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25) beim Strukturieren entfernt wird.

15

20

39. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 35 bis 38, wobei nach dem Abscheiden der ersten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15) und Abscheiden der zweiten Opferschicht (10), aber vor dem Abscheiden der zweiten Lage der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (25), ein chemisch mechanisches Polieren der Oberfläche des Strahlungsdetektors (1) ausgeführt wird.

25

40. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 26 bis 39, wobei die Strukturierung der Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15, 25, 35) mittels Lithographie und/oder reaktivem Ionenätzen ausgeführt wird.

30

41. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) nach einem der Ansprüche 26 bis 40, wobei nach dem Abscheiden der ersten, zweiten oder weiteren, zweiten Opferschicht (9,10, 11) eine, vorzugsweise in Reihenfolge, Schutz-

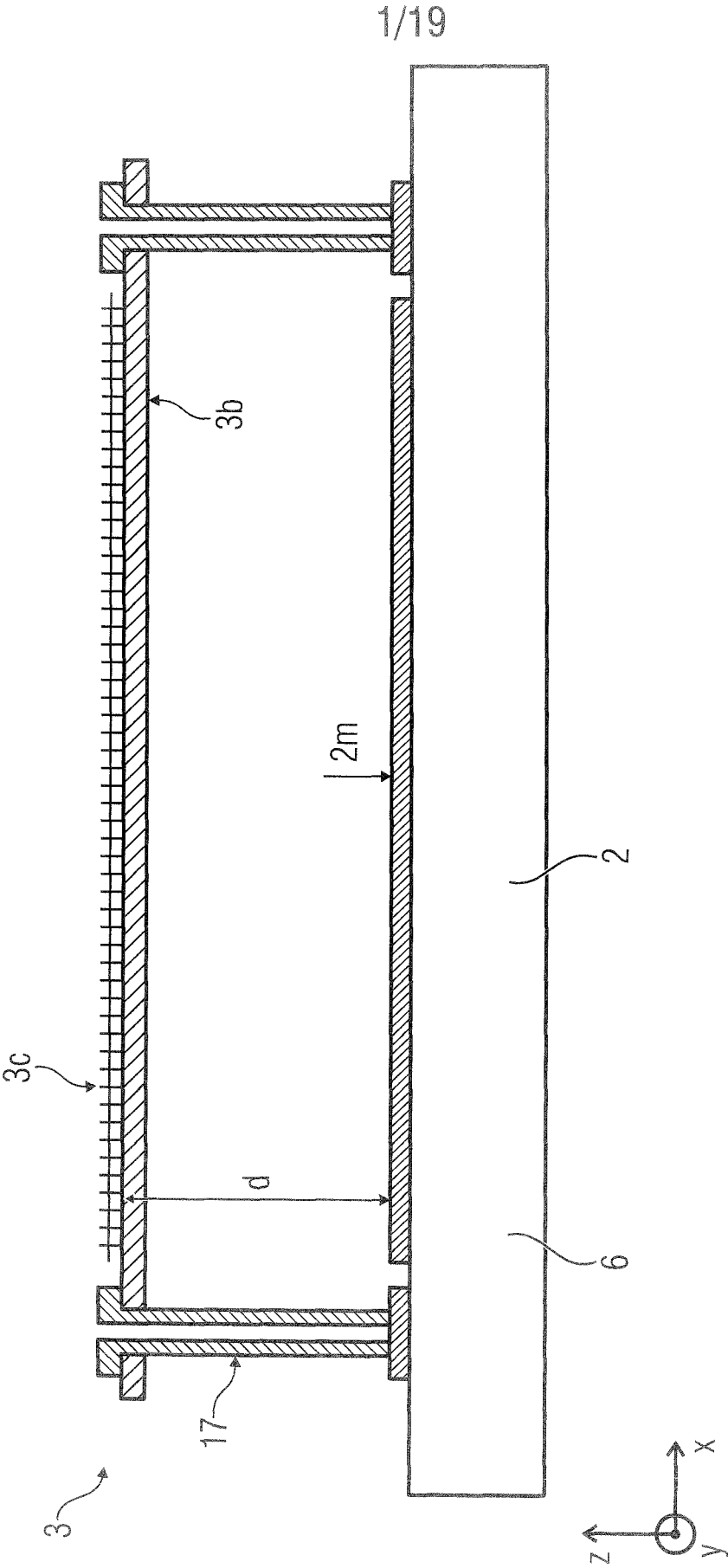
und/oder Sensorschicht (3a, 3b), welche die Membran (3) bilden, abgeschieden werden.

5 42. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 16 bis 20, wobei eine elektrisch und thermisch leitfähige Schicht (8), welche den zumindest einen Abstandshalter (14) bildet, bis zu der oder in die Vertiefung abgeschieden wird.

10 43. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors gemäß einem der Ansprüche 21 bis 24, wobei während der Herstellung Löcher (7) für die Abscheidung von Abstandshaltern (14) so in eine Opferschicht (9) auf dem Substrat (2) geätzt werden, dass die Abstandshalter (14) nach dem Abscheiden in die Löcher (7) eine Wandrauigkeit oder Welligkeit aufweisen um Phononentransport durch Oberflächenstreuungseffekte und/oder durch eine resultierende Wegverlängerung zu reduzieren.

15 44. Verfahren zur Herstellung eines Strahlungsdetektors (1) gemäß einem der Ansprüche 25 bis 43, wobei auf den zumindest einen Abstandshalter (14) und/oder die einzelnen Lagen der elektrisch und thermisch leitfähigen Schicht (15, 25, 35) eine Ätzenschutzschicht abgeschieden wird.

20



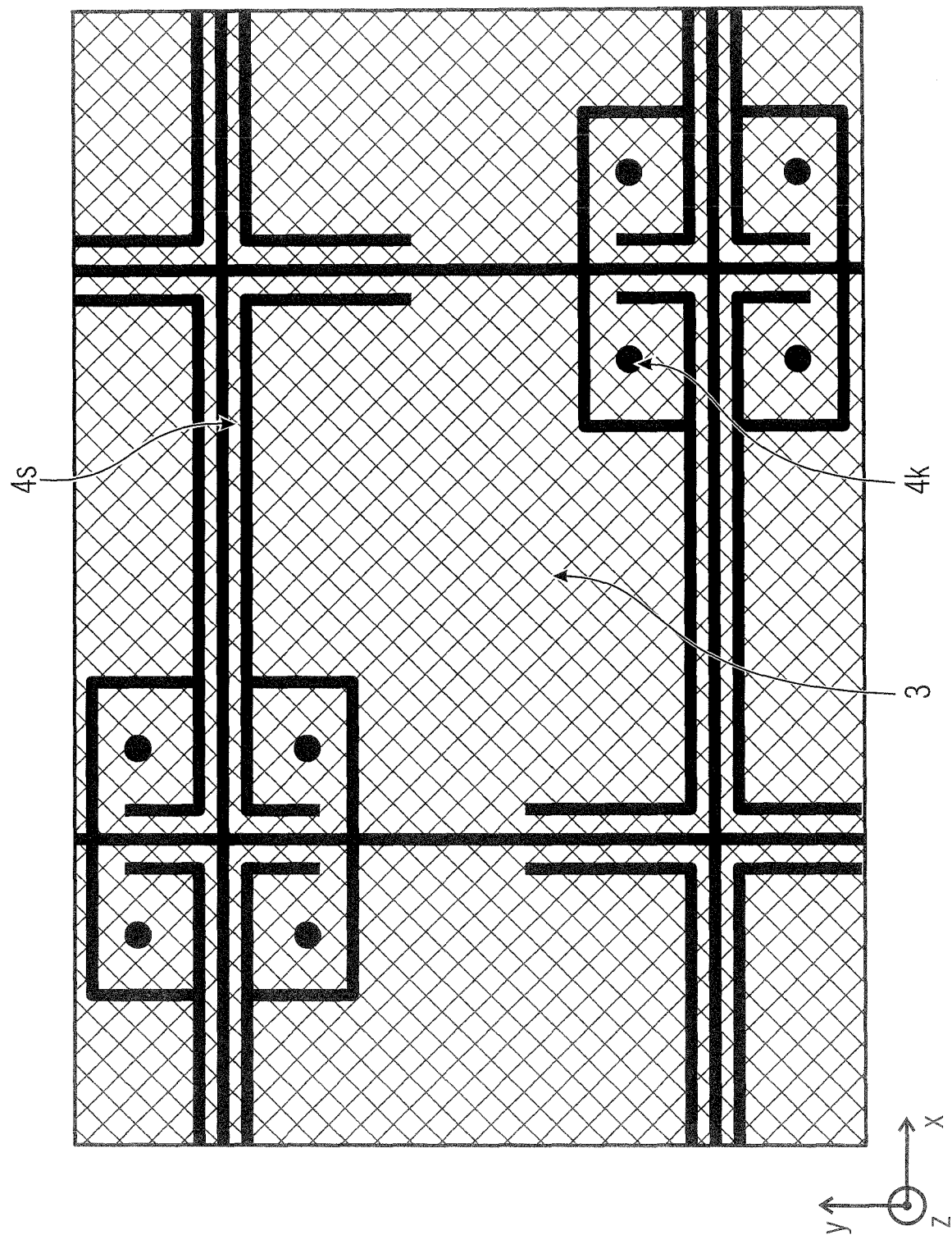


Fig. 2

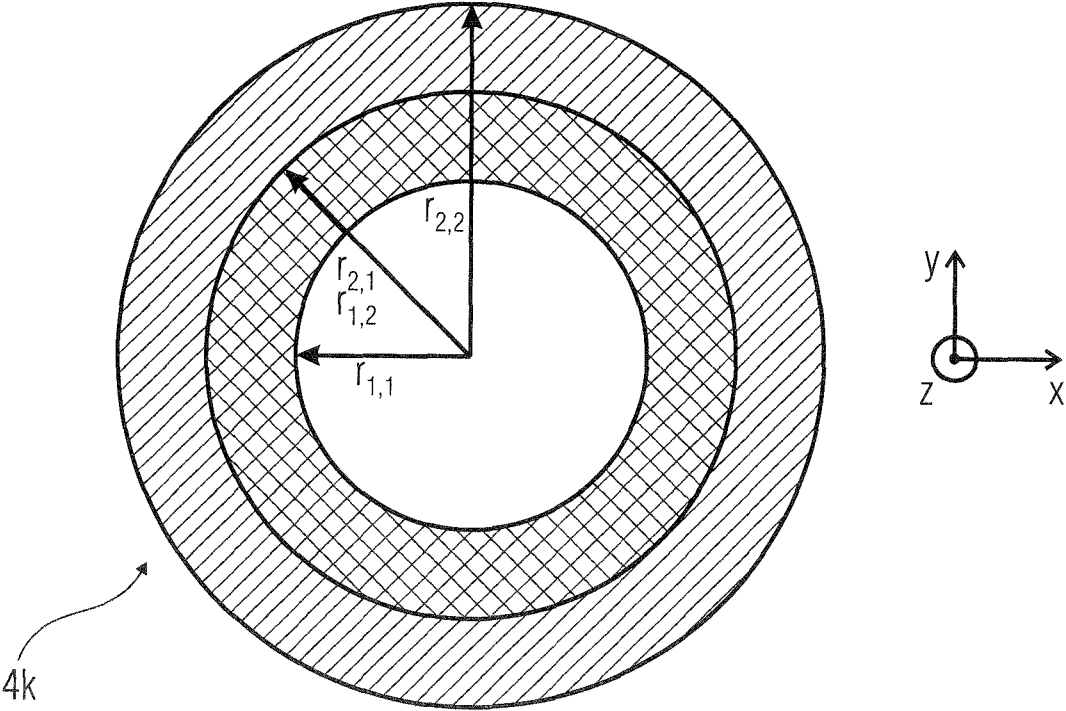


Fig. 3

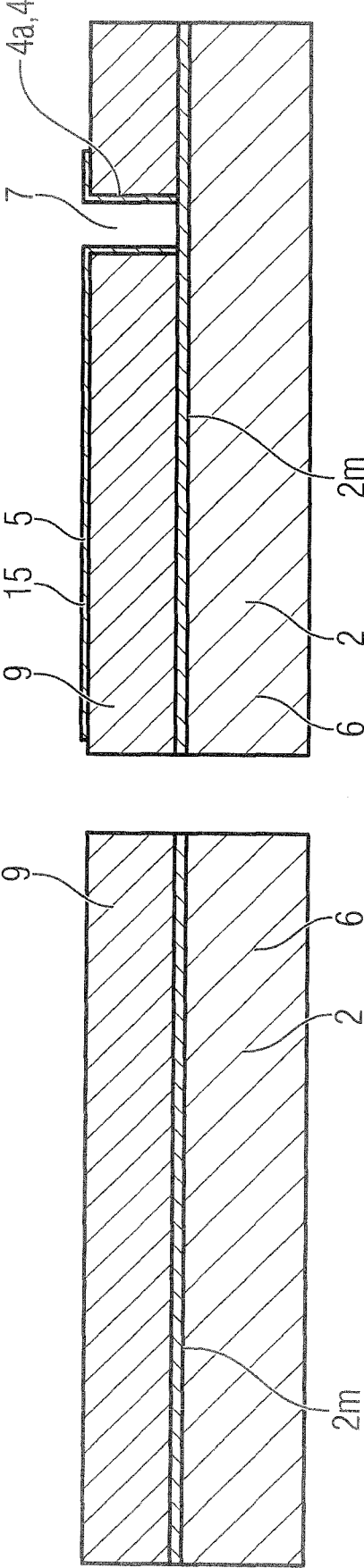


Fig. 4a

Fig. 4b

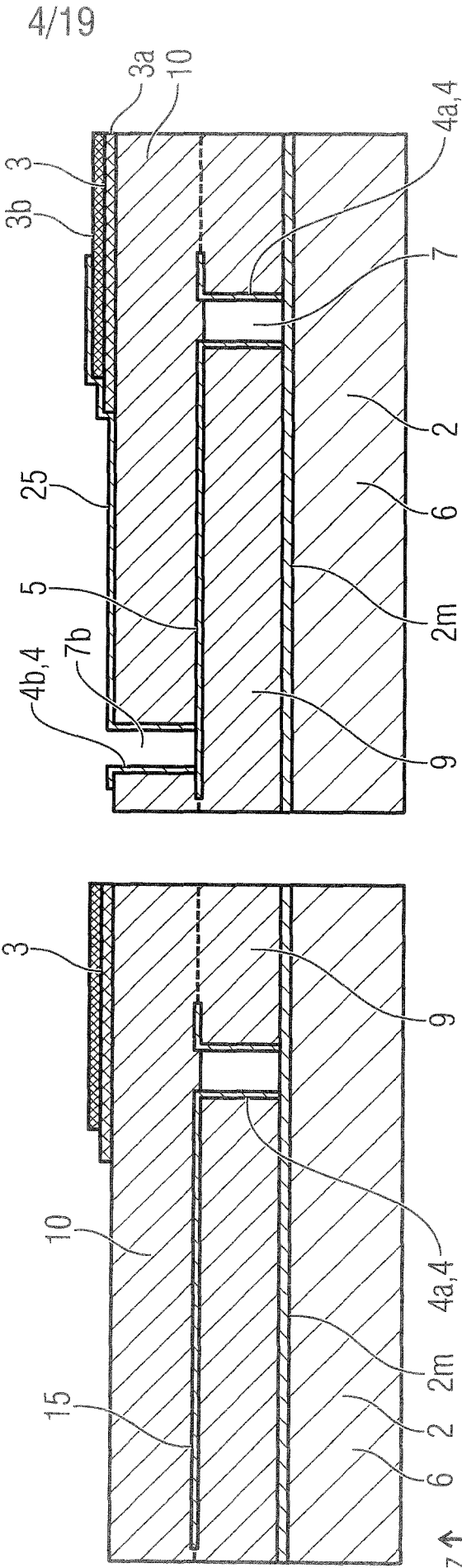


Fig. 4c

Fig. 4d

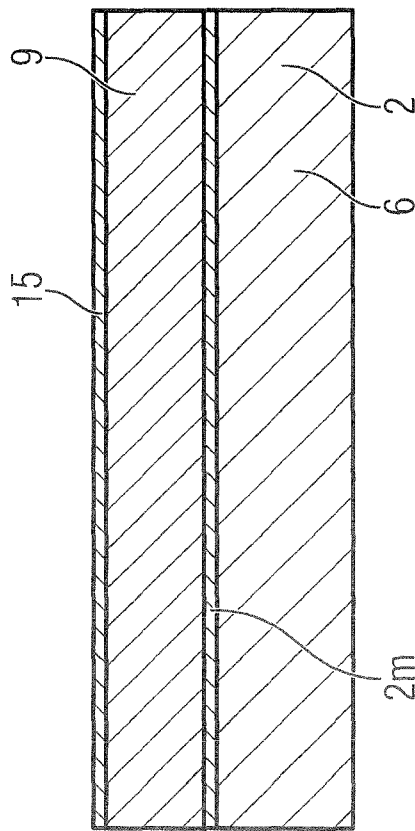


Fig. 5a

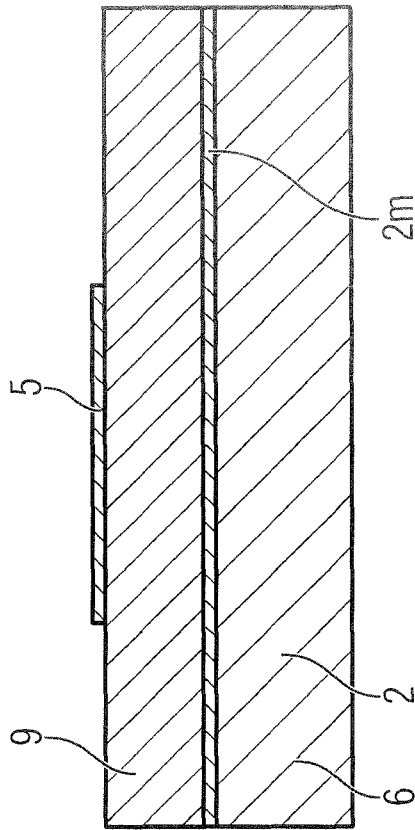
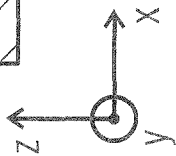


Fig. 5b

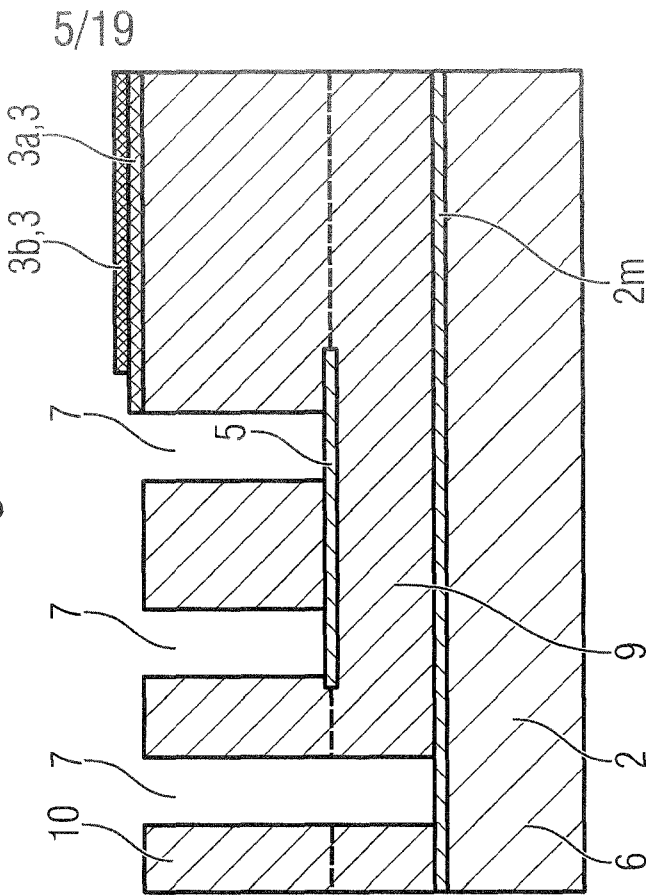


Fig. 5c

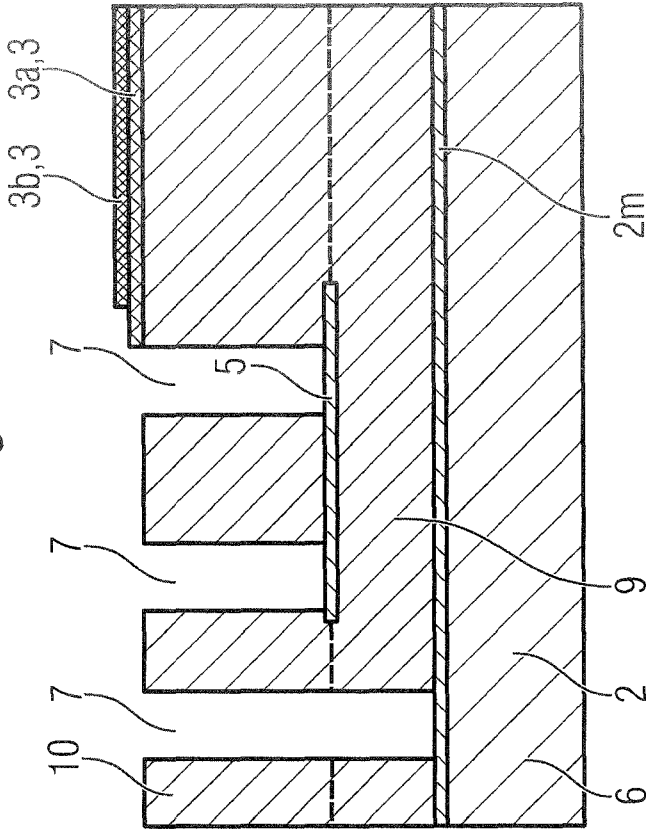


Fig. 5d

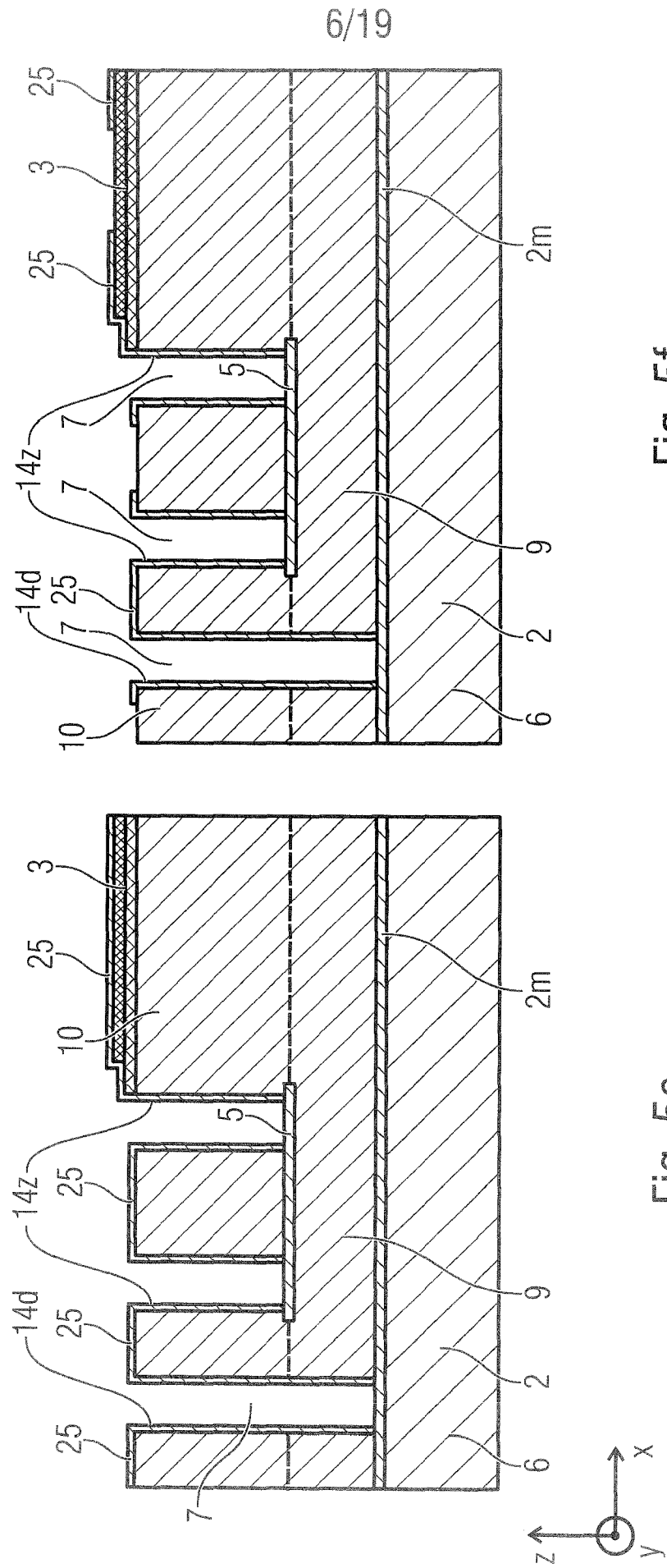


Fig. 5f

Fig. 5e

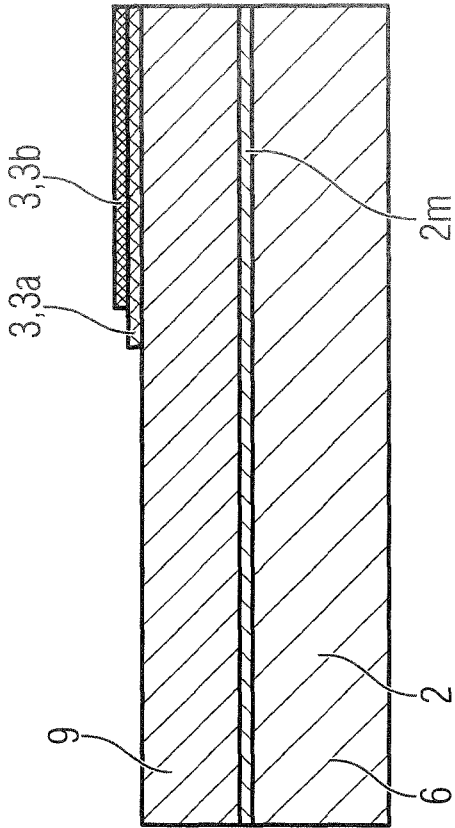


Fig. 6a

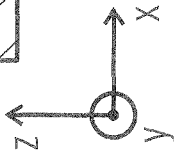


Fig. 6b

7/19

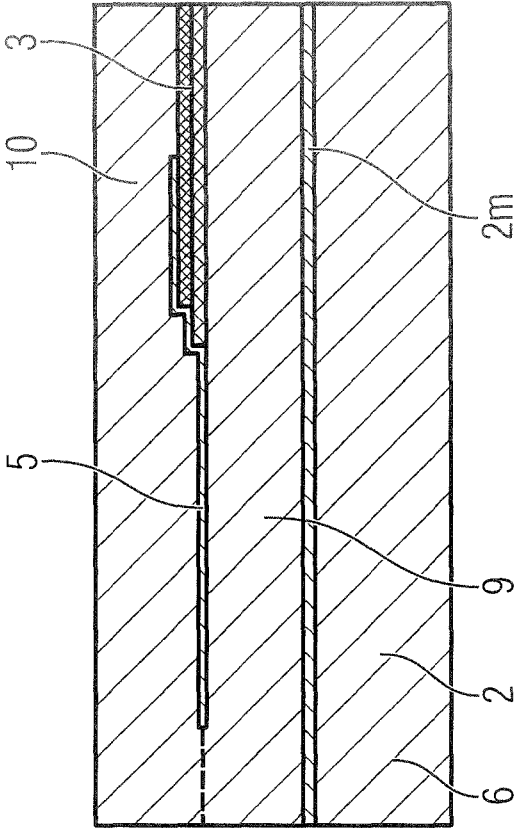


Fig. 6c

Fig. 6d

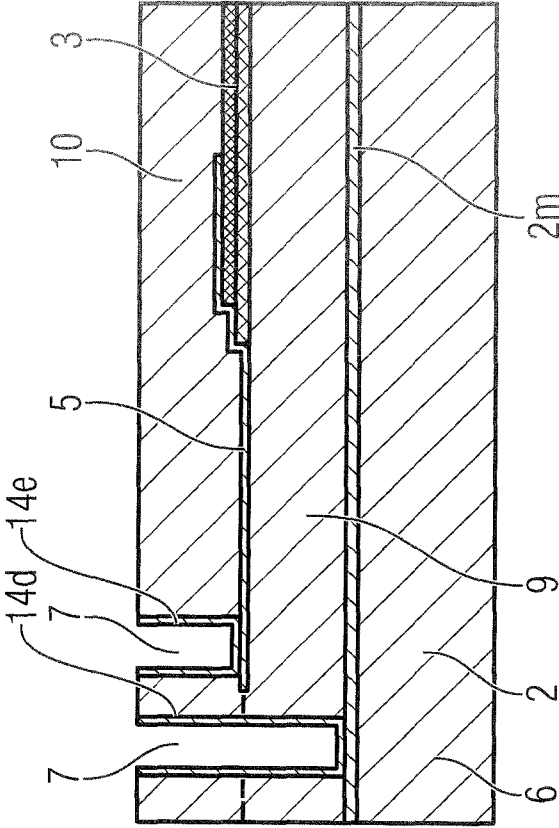


Fig. 6f

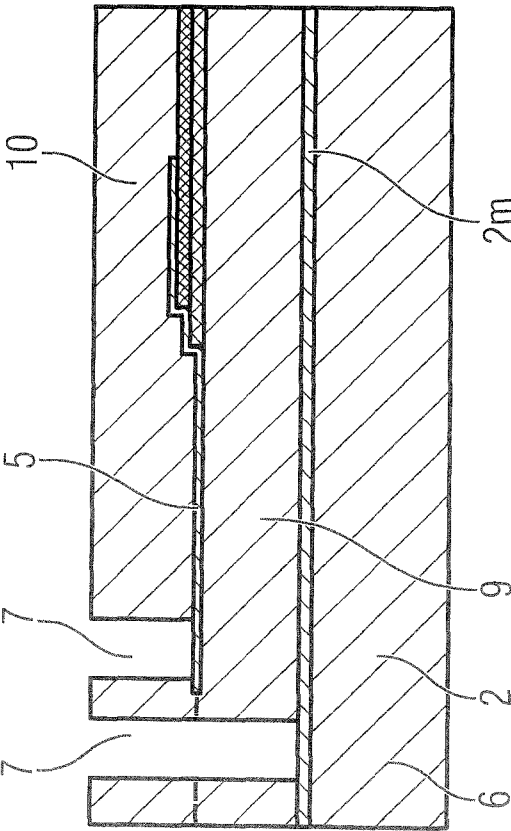
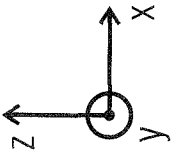


Fig. 6e

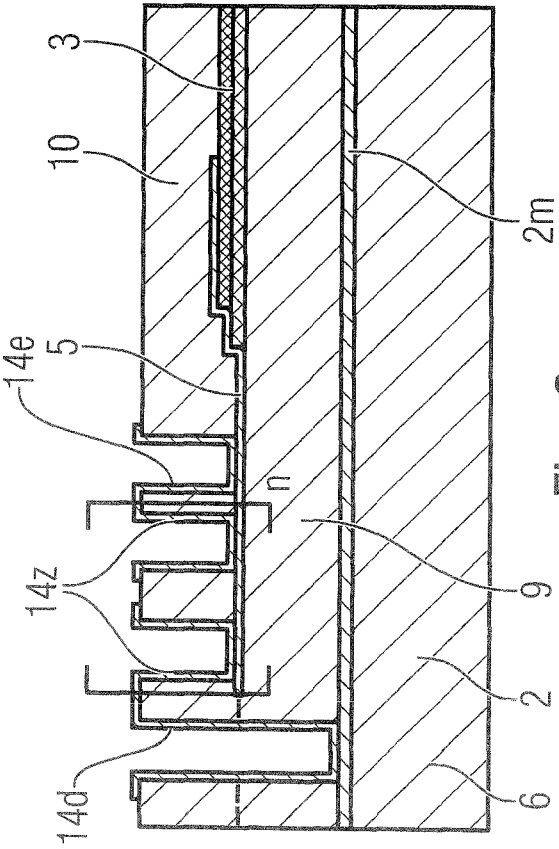


Fig. 6g

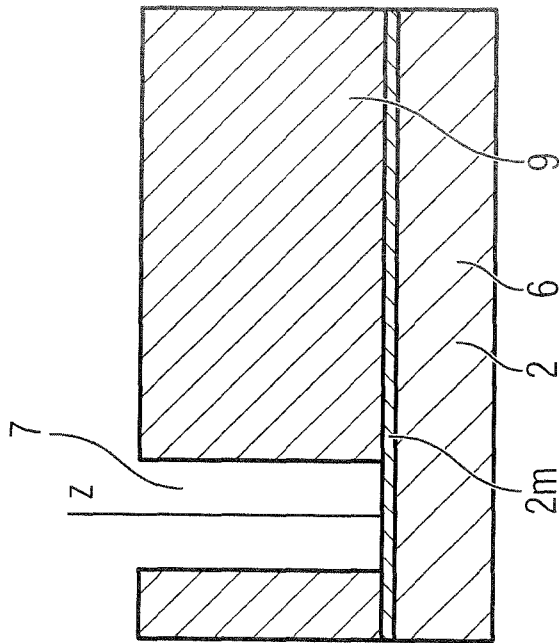


Fig. 7b

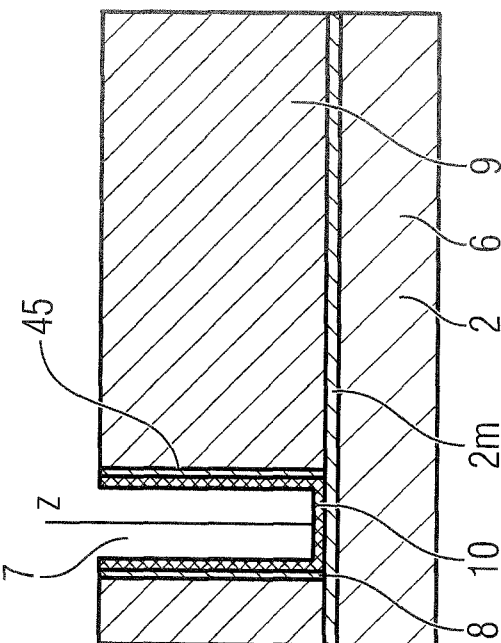


Fig. 7d

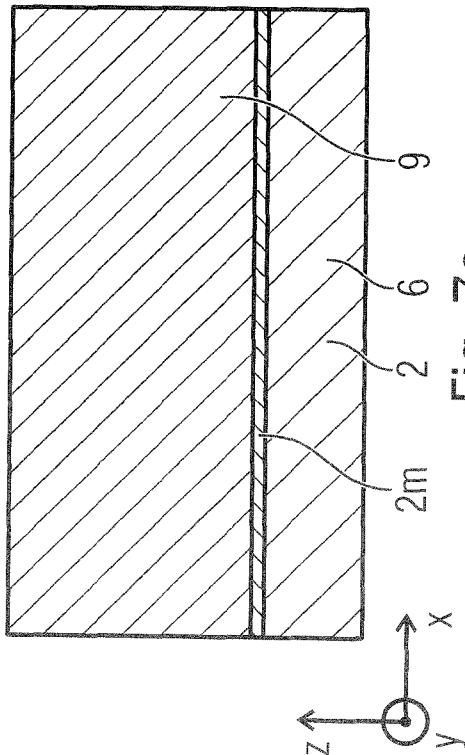


Fig. 7a

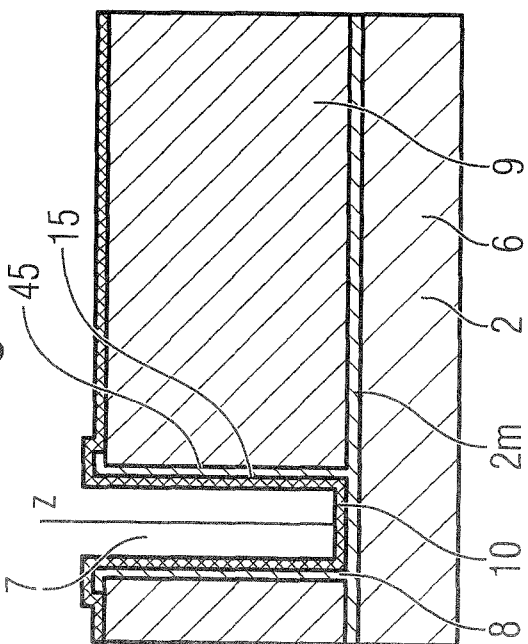


Fig. 7c

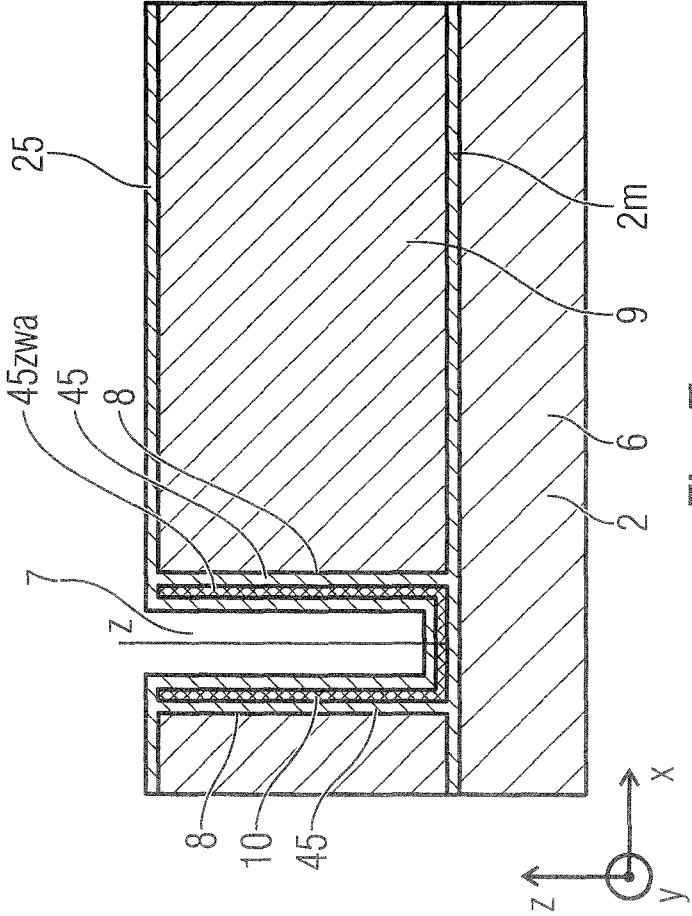


Fig. 7e

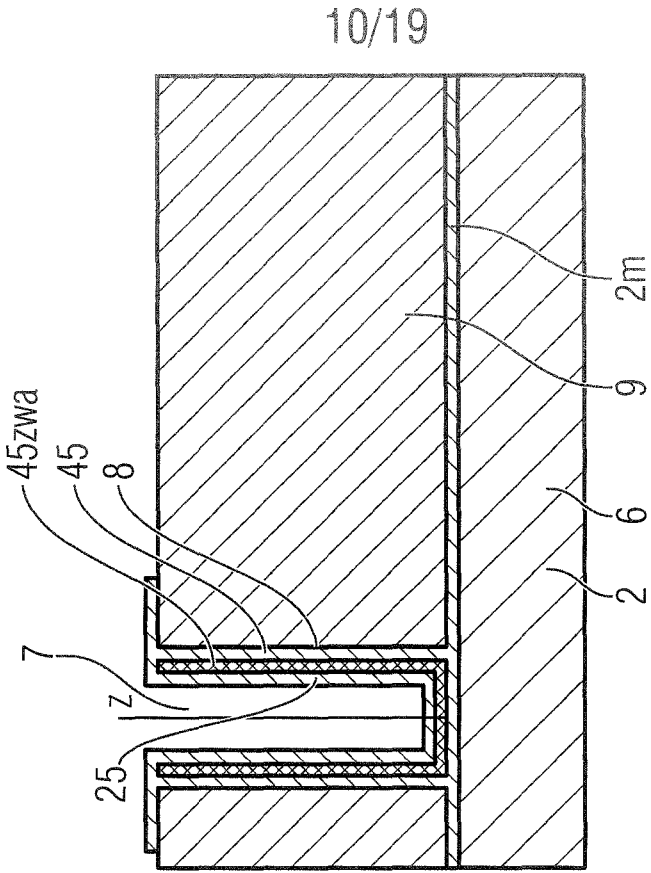
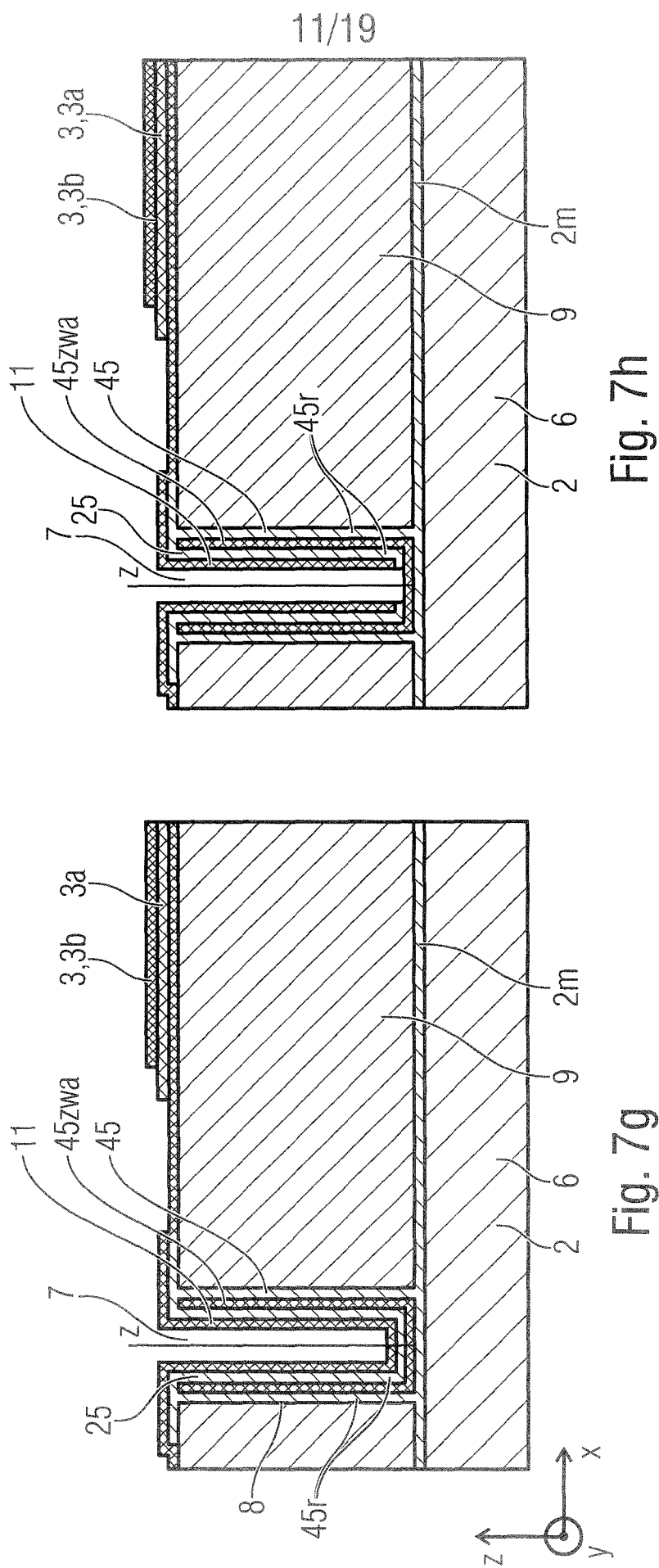


Fig. 7f



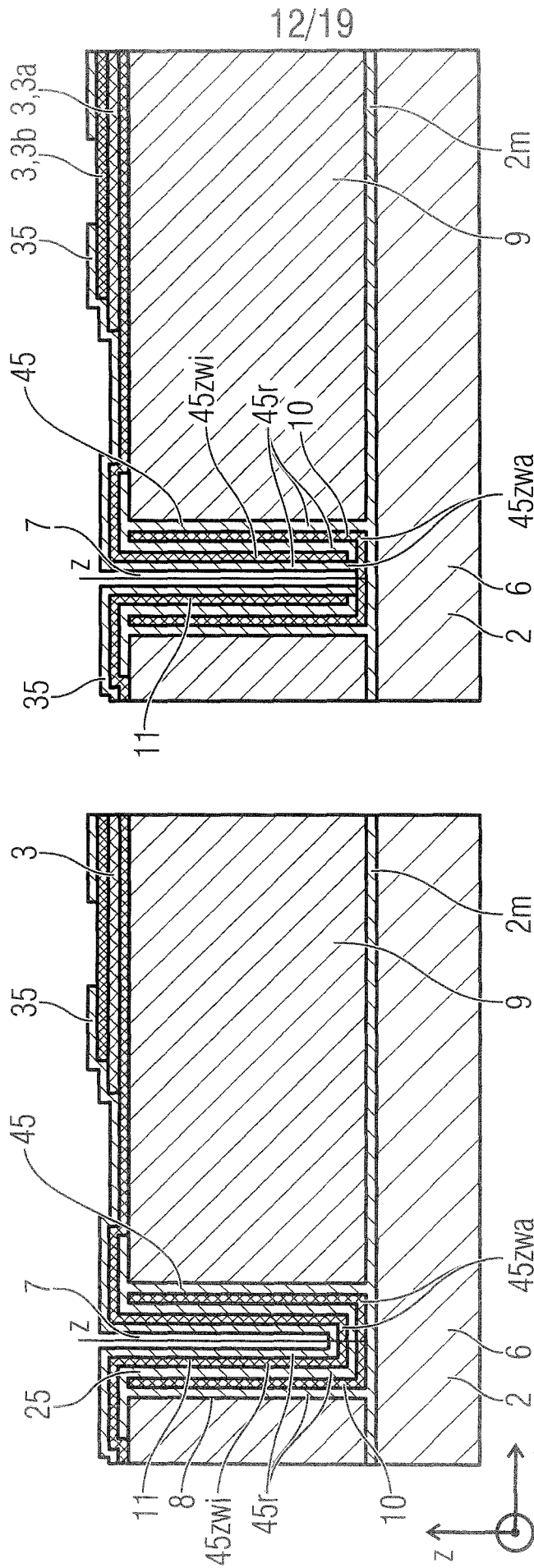
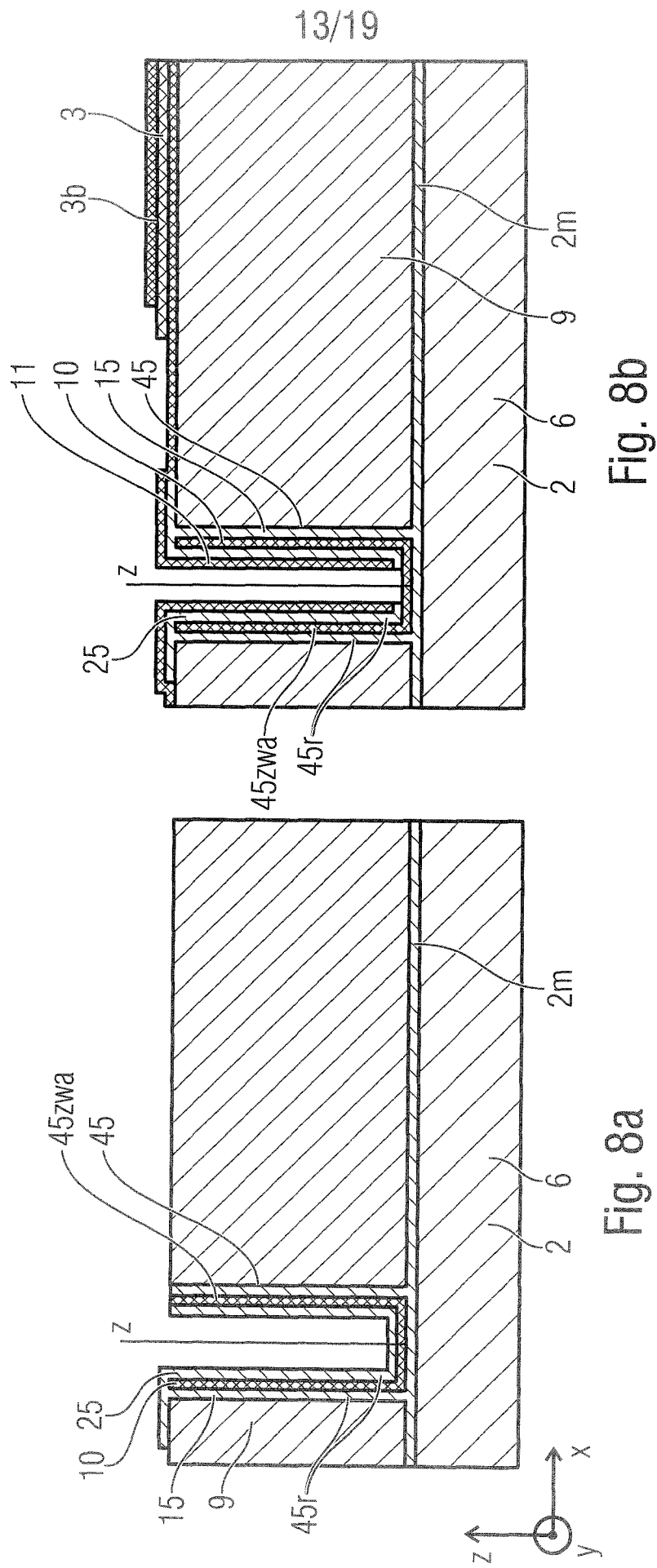


Fig. 7j

Fig. 7i



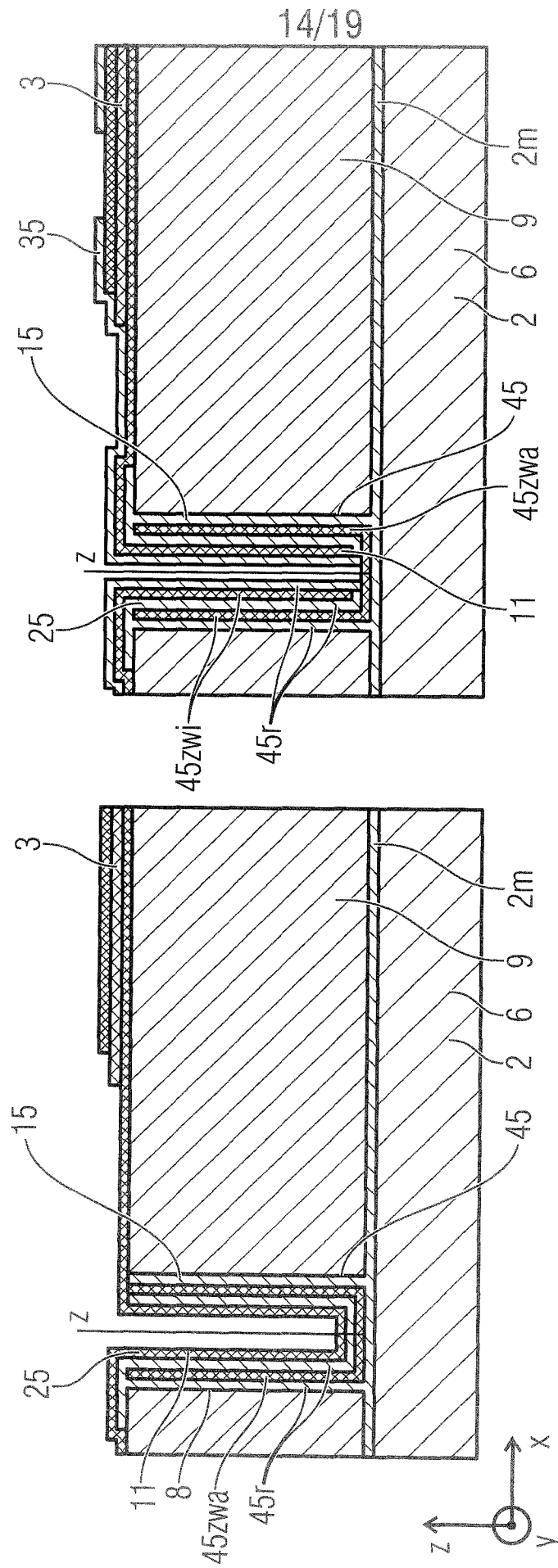


Fig. 8d

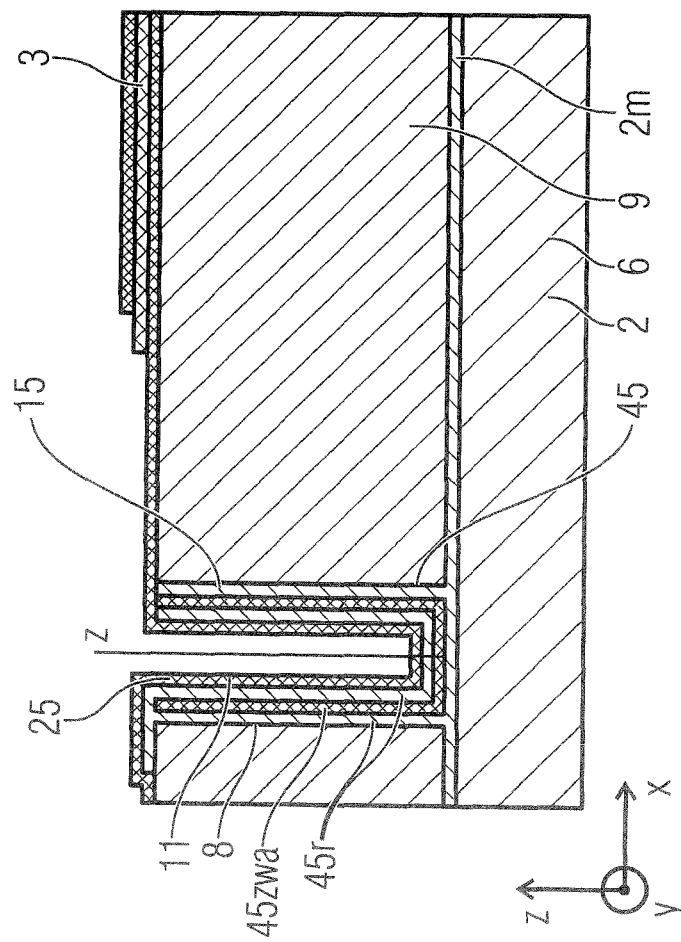


Fig. 8c

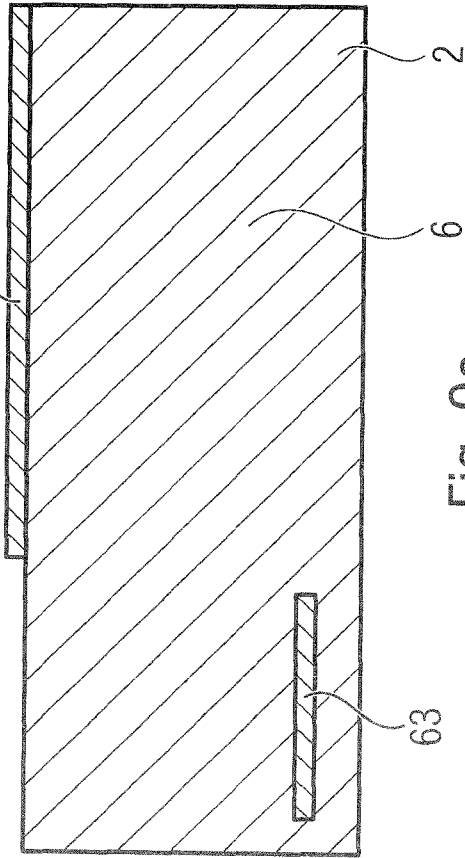
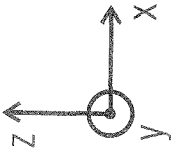


Fig. 9a

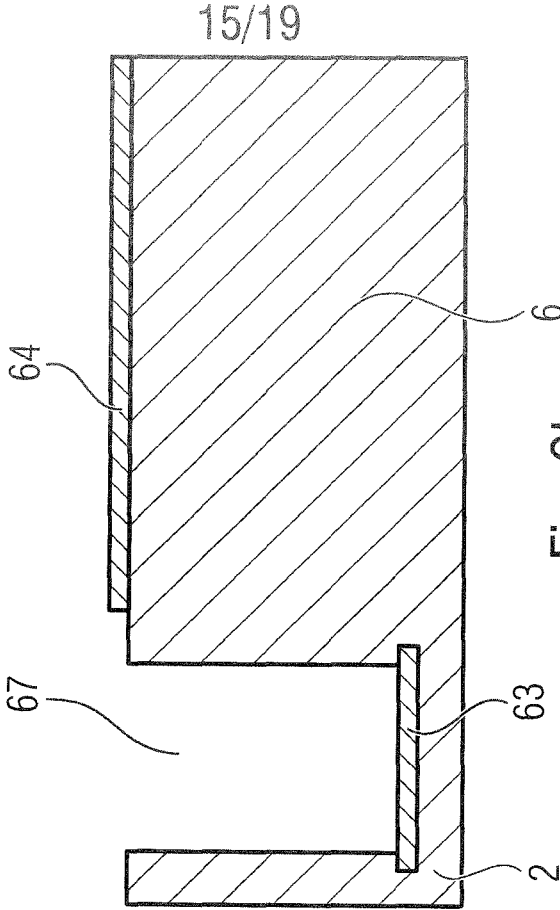


Fig. 9b

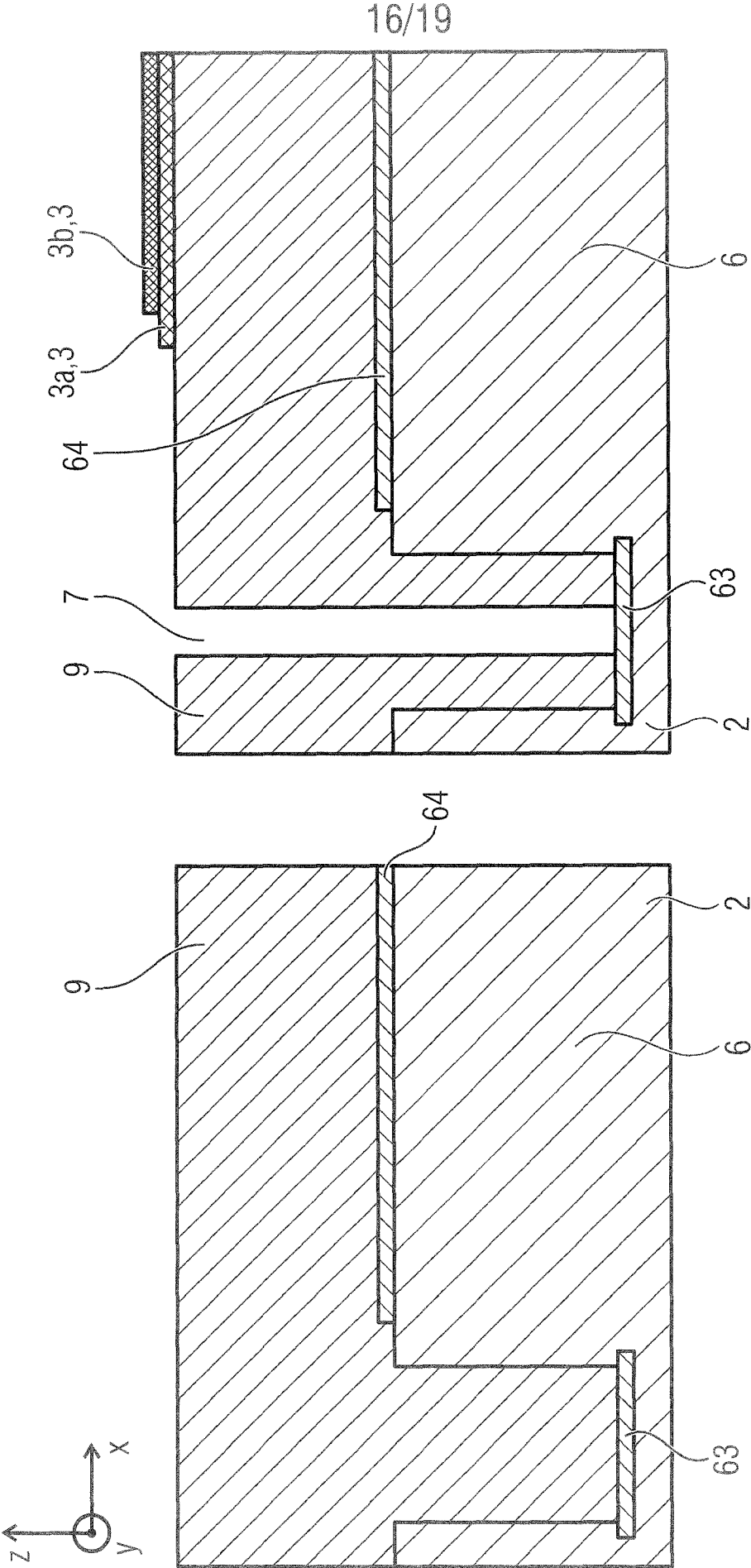


Fig. 9d

Fig. 9c

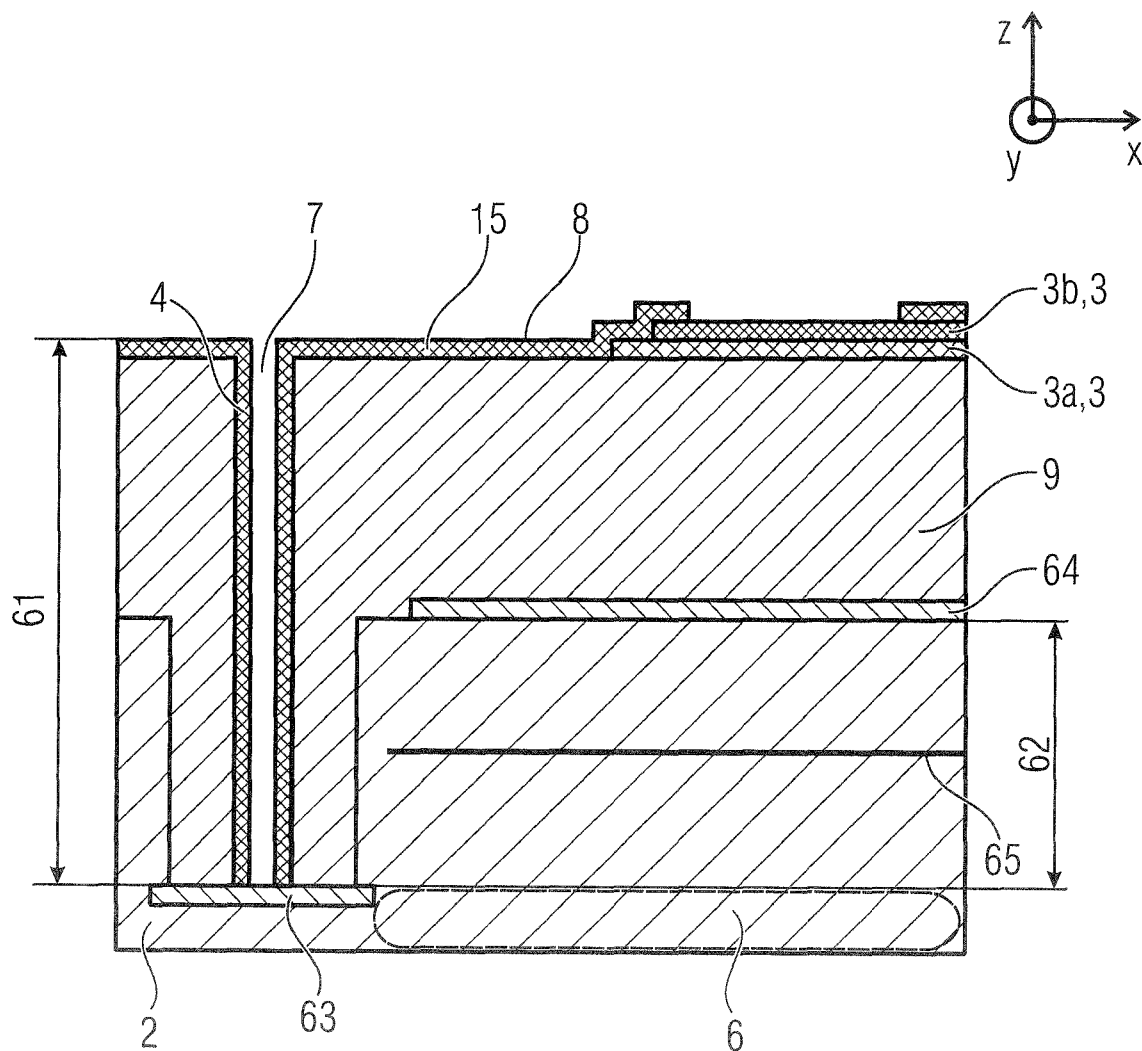


Fig. 9e

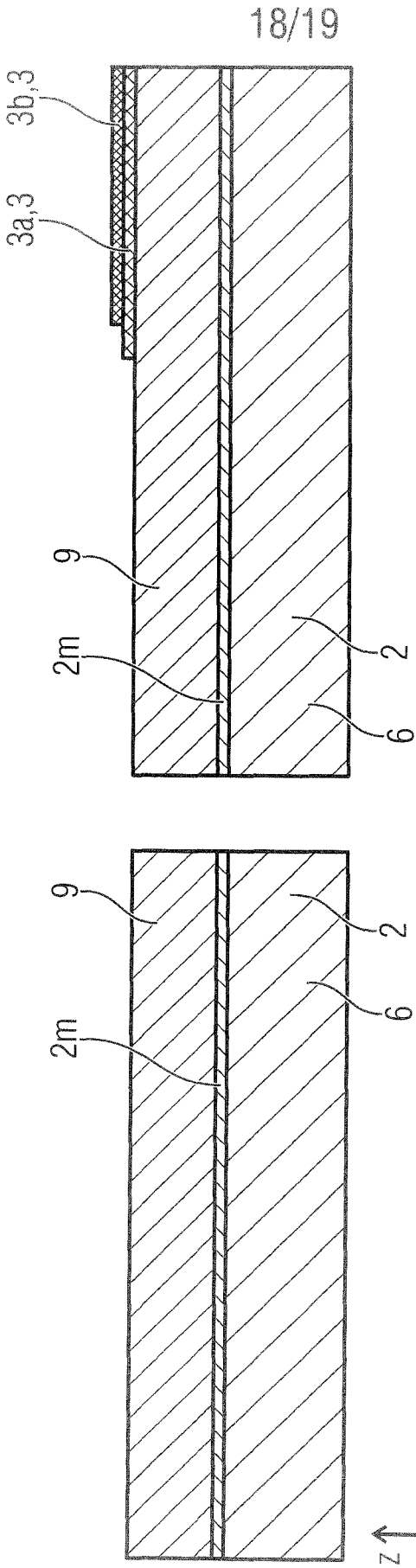


Fig. 10a

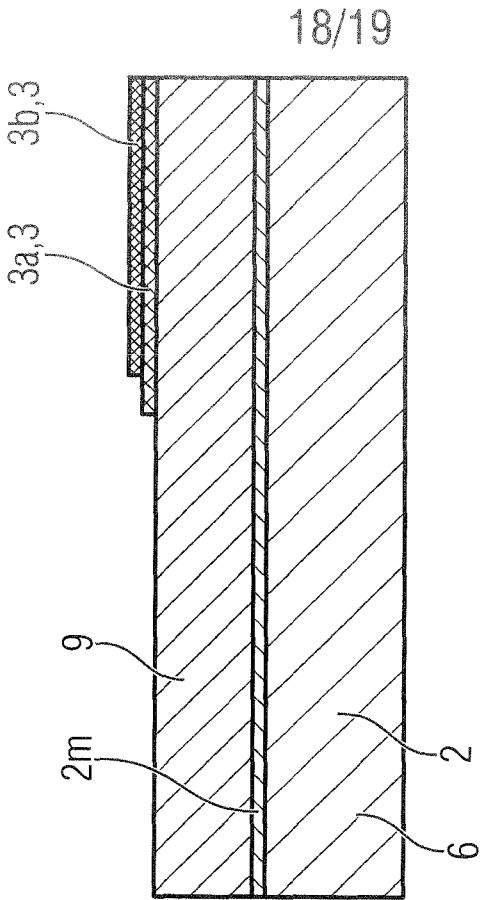


Fig. 10b

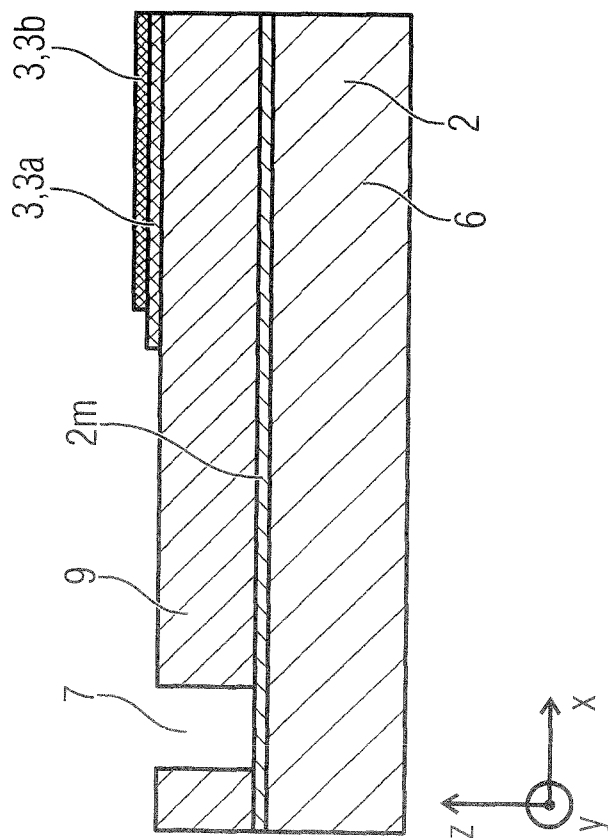


Fig. 10c

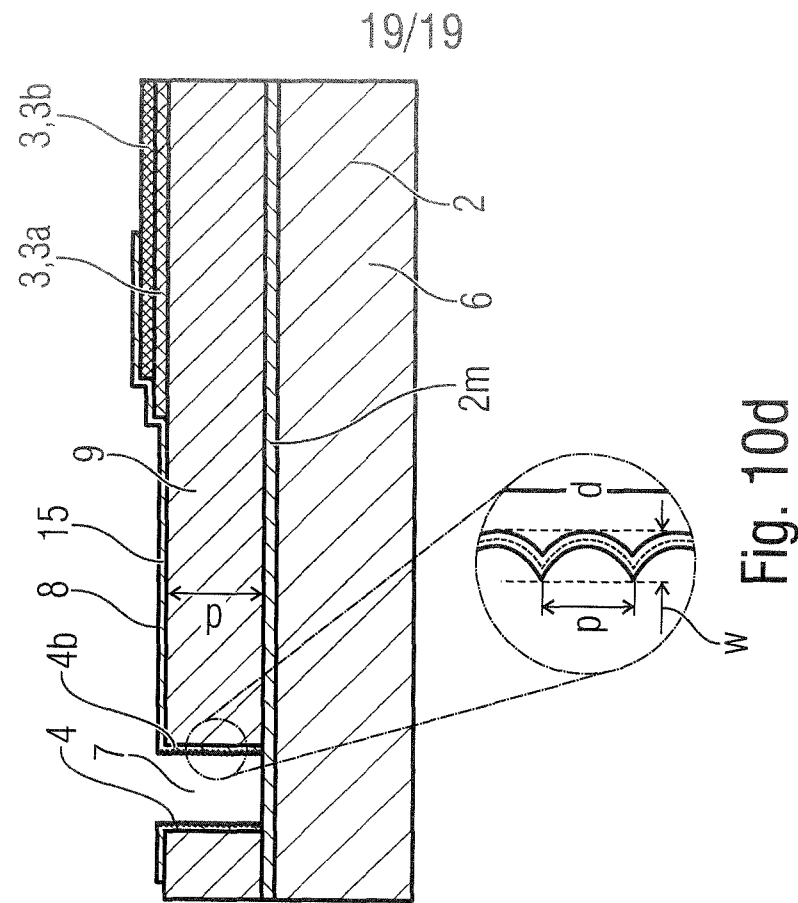


Fig. 10d