

(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
31. Mai 2018 (31.05.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/096099 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 6/30 (2006.01) G02B 6/122 (2006.01)
G02F 1/01 (2006.01) G02B 6/14 (2006.01)
G02B 6/12 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/080344

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. November 2017 (24.11.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 223 455.2
25. November 2016 (25.11.2016) DE

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

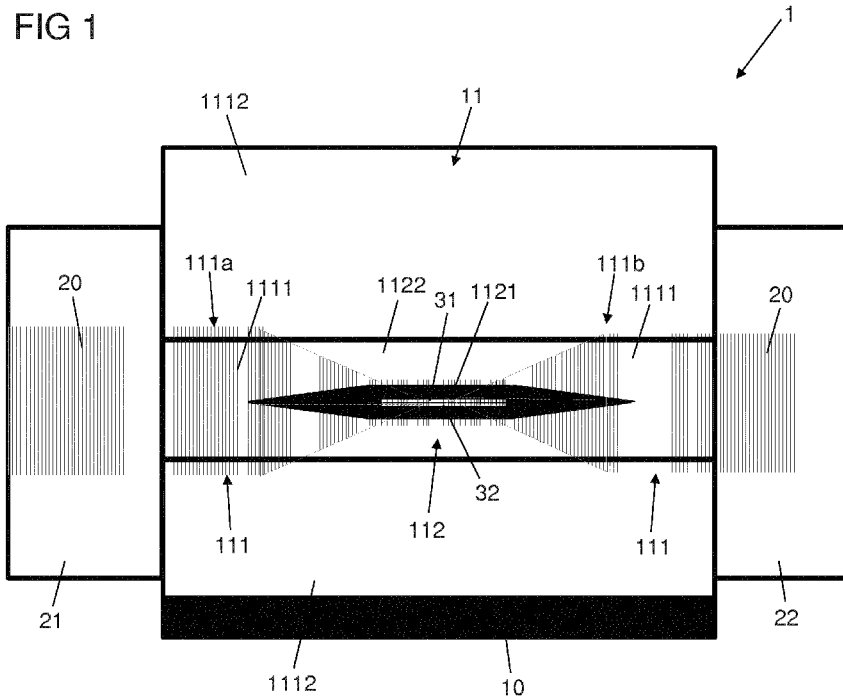
(72) Erfinder: KLEINERT, Moritz; Florastraße 57b, 13187 Berlin (DE).

(74) Anwalt: MAIKOWSKI & NINNEMANN PATENTANWÄLTE PARTNERSCHAFT MBB; Postfach 15 09 20, 10671 Berlin (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,

(54) Title: OPTOELECTRONIC COMPONENTS AND METHOD FOR PRODUCING AN OPTOELECTRONIC COMPONENT

(54) Bezeichnung: OPTOELEKTRONISCHE BAUELEMENTE UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN EINES OPTOELEKTRONISCHEN BAUELEMENTES



(57) Abstract: The invention relates to an optoelectronic component comprising an optical waveguide (11) having at least one passive section and at least one active section (111, 112), wherein the active section (112) comprises at least one layer (31, 32) made of a two-dimensional material, the layer (31, 32) made of the two-dimensional material is at least partially arranged in a core (1121) of the active section (112) of the waveguide or is at least partially adjacent to the core (1121) of the active section (112) of the waveguide. According to the invention, the difference between the index of refraction, relative to the same wavelength, of a core material that forms the core (1121) of the active section (112) of the waveguide and the index of refraction of a cladding material that forms a cladding (1122) of the active section (112) of the waveguide is greater than the difference between the index of refraction of a core material that forms a



WO 2018/096099 A2

NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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)

core (1111) of the passive section (111) of the waveguide and the index of refraction of a cladding material (1112) that forms a cladding (1112) of the passive section (111) of the waveguide. The invention also relates to a method for producing an optoelectronic component.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein optoelektronisches Bauelement, mit einem optischen Wellenleiter (11), der mindestens eine passive und mindestens eine aktive Sektion (111, 112) umfasst, wobei die aktive Sektion (112) mindestens eine aus einem zweidimensionalen Material gebildete Lage (31, 32) aufweist, wobei die Lage (31, 32) aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) angeordnet ist. Erfindungsgemäß ist der Brechungsindexunterschied bezogen auf dieselbe Wellenlänge zwischen einem den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel (1122) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Mantelmaterial größer als der Brechungsindexunterschied zwischen einem einen Wellenleiterkern (1111) der passiven Sektion (111) ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel (1112) der passiven Sektion (111) ausbildenden Mantelmaterial (1112). Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes.

5

10

Optoelektronische Bauelemente und Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes

15

20

Beschreibung

25

Die Erfindung betrifft optoelektronische Bauelemente gemäß den Oberbegriffen der Ansprüche 1 und 15 sowie ein Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 23.

30

35

Zweidimensionale Materialien derartiger optoelektronischer Bauelemente bestehen aus einer nahezu mono-atomaren oder mono-molekularen Schicht in einer charakteristischen Anordnung. Derartige Materialien haben grundsätzlich andere Eigenschaften als konventionelle dreidimensionale Kristalle aus denselben Atomen oder Molekülen in anderer Struktur. Besonders interessante Eigenschaften der zweidimensionalen Materialien sind ihre hohe mechanische Festigkeit und in elektrooptischer Hinsicht eine Bandlücke, die sich durch Anlegen einer Spannung z.B. von 0 eV auf mehrere eV einstellen lässt. Somit lassen sich mit den zweidimensionalen Materialien z.B. Fotodetektoren und Lichtmodulatoren für sehr weite Wellenlängenbereiche realisieren. Ein bekanntes zweidimensionales Material ist das auf Kohlenstoffatomen basierende Graphen, das z.B. auf Kupferträgern hergestellt und nach Herstellung von diesen abgelöst wird.

Zur Ausbildung von optoelektronischen Bauelementen werden Lagen aus einem zweidimensionalen Material insbesondere in optische Wellenleiter integriert. So offenbart zum Beispiel die EP 2 584 397 A1 einen optischen Wellenleiter mit einem eine Rippenstruktur ausbildenden Siliziumkern, wobei eine Lage aus Graphen über die Rippenstruktur gelegt ist. Mit dieser Anordnung befindet sich das Intensitätsmaximum der im Wellenleiter geführten Wellen jedoch beabstandet zu der Graphenlage. Zudem besitzen die sich in dem Wellenleiter ausbreitenden Lichtmoden einen deutlich anderen Durchmesser als Moden in Glasfasern, mit denen Licht aus dem Bauelement ein- und ausgekoppelt wird. Hierdurch können hohe Kopplungsverluste auftreten.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, einerseits eine möglichst gute Führung einer Lichtwelle und andererseits eine möglichst verlustarme Ankopplung des Bauelementes zu einer Glasfaser zu realisieren.

Dieses Problem wird durch die Bereitstellung der optoelektronischen Bauelemente mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. des Anspruchs 15 sowie durch das Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes gemäß Anspruch 23 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Danach wird ein optoelektronisches Bauelement bereitgestellt, mit

- einem optischen Wellenleiter, der mindestens eine passive und mindestens eine aktive Sektion umfasst, wobei
- die aktive Sektion mindestens eine aus einem zweidimensionalen Material gebildete (und insbesondere mit einem Kontakt versehene) Lage aufweist, wobei die Lage aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern der aktiven Sektion oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern der aktiven Sektion angeordnet ist, und wobei
- der Brechungsindexunterschied bezogen auf dieselbe Wellenlänge zwischen einem den Wellenleiterkern der aktiven Sektion ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel der aktiven Sektion ausbildenden Mantelmaterial größer ist als der Brechungsindexunterschied zwischen einem einen Wellenleiterkern der passiven Sektion ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel der passiven Sektion ausbildenden Mantelmaterial.

Durch den größeren Brechungsindexunterschied in der aktiven Sektion des Wellenleiters erfährt eine Lichtwelle dort eine stärkere Führung als in der passiven Wellenleitersektion. Dies

hat zur Folge, dass die Lichtwelle in der aktiven Sektion eine geringere Ausdehnung und somit eine höhere Intensität im Wellenleiterzentrum, d.h. im Bereich der Lage aus dem zweidimensionalen Material, besitzt. Infolgedessen erhöht sich die Effizienz der Interaktion der Lichtwelle mit dem zweidimensionalen Material und damit die Effizienz des gesamten Bauelementes.

5 Gleichzeitig erfährt die Lichtwelle in der passiven Sektion eine schwächere Führung, was zu einer größeren Ausdehnung der Lichtwelle in diesem Bereich führt. Dies wiederum reduziert Kopplungsverluste zwischen dem optoelektronischen Bauelement und einer Glasfaser, über die die Lichtwelle in das Bauelement ein- und/oder aus dem Bauelement ausgekoppelt wird. Der Wellenleiterkern der aktiven Sektion ist insbesondere so in dem Wellenleitermantel ange-

10 ordnet, dass er beidseitig (d.h. mit seiner Ober- und Unterseite) in das Mantelmaterial eingebettet ist.

Darüber hinaus ist die Lage aus dem zweidimensionalen Material insbesondere so in dem Wellenleiterkern der aktiven Sektion platziert, dass das Kernmaterial zwei einander gegen-

15 überliegende Seiten der Lage jeweils zumindest teilweise bedeckt, d.h. das Kernmaterial grenzt an eine Ober- und eine Unterseite der Lage aus dem zweidimensionalen Material an. Denkbar ist jedoch auch, dass die Lage aus dem zweidimensionalen Material nur einseitig an das Kernmaterial angrenzt, d.h. das Kernmaterial befindet sich nur auf einer Seite der Lage. Beispielsweise ist hier die Lage aus dem zweidimensionalen Material zwischen dem Kern- und

20 dem Mantelmaterial positioniert. Insbesondere grenzt die Lage aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise (insbesondere unmittelbar) an eine Ober- oder Unterseite des Wellenleiterkerns der aktiven Sektion an. So kann die Lage beispielsweise unmittelbar von oben oder unten an das Kernmaterial angrenzen. Die Ober- bzw. Unterseite des Wellenleiterkerns wird insbesondere durch eine einem Substrat ab- bzw. zugewandte Seite des Wellen-

25 leiterkerns ausgebildet.

Des Weiteren unterscheidet sich das Kernmaterial der aktiven Sektion insbesondere von dem Kernmaterial der passiven Sektion und/oder das Mantelmaterial der aktiven Sektion unterscheidet sich von dem Mantelmaterial der passiven Sektion. Mögliche Materialien zur Ausbil-

30 dung des Kernmaterials der aktiven bzw. der passiven Sektion und des Mantelmaterials der aktiven bzw. der passiven Sektion werden weiter unten erläutert.

Gemäß einer anderen Ausgestaltung der Erfindung ist die aktive Sektion des optischen Wellenleiters stark führend und die passive Sektion des optischen Wellenleiters schwach führend

35 ausgebildet. Beispielsweise beträgt der Brechungsindexunterschied zwischen dem Kern- und dem Mantelmaterial der aktiven Sektion mindestens 0,2, mindestens 0,3 oder mindestens 0,4. Der Brechungsindexunterschied zwischen dem Kern- und dem Mantelmaterial der passiven

Sektion beträgt zum Beispiel höchstens 0,1 oder höchstens 0,05. Beispielsweise weisen das Kern- und das Mantelmaterial (z.B. ein Polymer oder dotiertes oder undotiertes Siliziumdioxid) des passiven Bereichs jeweils einen Brechungsindex zwischen 1,40 bis 1,55 auf, wobei der Brechungsindex des Kernmaterials größer als der Brechungsindex des Mantelmaterials ist.

5

Möglich ist darüber hinaus, dass das Kernmaterial der aktiven Sektion zur lateralen Führung einer Lichtwelle strukturiert ist. Beispielsweise weist das Kernmaterial der aktiven Sektion eine Rippen- oder Streifenstruktur auf. Insbesondere kann dadurch ein sog. „single mode“ (einmodiger) Wellenleiter ausgebildet werden.

10

Denkbar ist zudem, dass die aktive Sektion des Wellenleiters so ausgebildet ist (insbesondere der dortige Brechungsindexunterschied zwischen dem Kern- und dem Mantelmaterial), dass die in diesem Bereich geführte Lichtwelle einen Durchmesser von weniger als 3 μm oder weniger als 2 μm (z.B. zwischen 2 und 3 μm) besitzt. Die passive Sektion des Wellenleiters (insbesondere im Bereich einer Facette des Wellenleiters) kann hingegen so ausgebildet sein, dass die dort geführte Lichtwelle einen Durchmesser von mindestens 3 μm oder mindestens 5 μm (z.B. zwischen 5 und 10 μm) aufweist.

15

Möglich ist dann auch, dass die Lage aus zweidimensionalem Material zumindest in einer Richtung der lateralen Ebene aus dem Wellenleiterkern seitlich heraus ragt und der herausragende Teil der Lage mit Abstand zur geführten optischen Welle elektrisch über einen Metallkontakt kontaktiert ist. Damit können Verluste der geführten optischen Welle durch den Metallkontakt vermieden werden.

20

Gemäß einer anderen Weiterbildung der Erfindung erstreckt sich das Kernmaterial der aktiven Sektion in die passive Sektion des Wellenleiters hinein, wobei die Ausdehnung des Kernmaterials senkrecht zur Längsrichtung, d.h. die Breite und/oder die Höhe, des optischen Wellenleiters mit der Entfernung von der aktiven Sektion abnimmt. Beispielsweise nimmt die Ausdehnung des Kernmaterials kontinuierlich mit der Entfernung von der aktiven Sektion (von der Lage aus dem zweidimensionalen Material) über eine Strecke von mindestens 30 μm oder mindestens 50 μm ab. Diese Ausführung dient der verlustfreien Transformation von optischen Moden der passiven und aktiven Sektion des Wellenleiters.

30

Die Führung der Lichtwellen durch das Kernmaterial der aktiven Sektion wird durch die Verjüngung des Kerns auf die passive Sektion zu immer schwächer, wobei der Durchmesser der Lichtwellen immer mehr zunimmt, bis schließlich die passive Sektion die Führung voll über-

35

nimmt. Denkbar ist, dass die kontinuierliche Verjüngung des Kernmaterials zur technologischen Vereinfachung zumindest vorwiegend auf den sich unter- oder oberhalb der Lage aus dem zweidimensionalen Material erstreckenden Bereich des Kernmaterials beschränkt ist. Möglich ist auch, dass die Breite und/oder Dicke des Kernmaterials nicht kontinuierlich bis auf null geht, sondern es kann jeweils an den Enden des Kernmaterials eine Restbreite und/oder -dicke, d.h. eine Stufe, vorhanden sein.

Denkbar ist auch, dass das Mantelmaterial der aktiven Sektion zumindest einen Teil des Kernmaterials der passiven Sektion ausformt, d.h. dass das Mantelmaterial der aktiven Sektion zumindest teilweise identisch mit dem Kernmaterial der passiven Sektion ist. Insbesondere verläuft das Kernmaterial der passiven Sektion durchgehend (einstückig) sowohl in der passiven, als auch in der aktiven Sektion, wobei es wie erwähnt in der aktiven Sektion den Wellenleitermantel der aktiven Sektion bildet. Die Kern- und Mantelschichten der aktiven und der passiven Sektion des Wellenleiters sind insbesondere auf einem gemeinsamen Träger angeordnet. Insbesondere ist das erfindungsgemäße Bauelement Teil einer Wellenleiterplattform, die z.B. Bestandteil einer größeren Anordnung ist. Beispielsweise ist die Wellenleiterplattform in ein Wellenleiternetzwerk oder ein Sensorsystem integriert.

Das zweidimensionale Material besteht beispielsweise aus einer Atomlage oder aus maximal zehn Atomlagen. Beispielsweise ist das zweidimensionale Material aus Graphen, triazinbasierten graphitischen Kohlenstoffnitrid, Germanen, Molybdändisulfid, Molybdändiselenid, Silicen und/oder schwarzer Phosphor gebildet oder weist zumindest eines dieser Materialien auf, und zwar jeweils ein- und mehratomlagig.

Die aktive Sektion des Wellenleiters (d.h. die aktive Sektion des Bauelementes) ist z.B. als Fotodetektor ausgebildet. Beispielsweise ist hierfür eine Lage (z.B. aus Graphen) aus dem zweidimensionalen Material vorhanden und entsprechend beschaltet. Insbesondere wird die Lage aus dem zweidimensionalen Material mit zwei elektrischen Kontakten versehen. In dem optischen Wellenleiter geführtes Licht wird zumindest teilweise von dem zweidimensionalen Material absorbiert, wobei über die Kontakte ein resultierender Fotostrom gemessen werden kann.

Möglich ist auch, dass die aktive Sektion als Lichtmodulator ausgebildet ist, wobei insbesondere mindestens zwei Lagen aus jeweils einem zweidimensionalen Material vorhanden sind, die elektrisch durch ein Dielektrikum voneinander isoliert sind. Denkbar ist, dass das Kernmaterial der aktiven Sektion des Wellenleiters gleichzeitig auch das Dielektrikum ausbildet. Ins-

besondere sind die beiden Lagen aus dem zweidimensionalen Material mit elektrisch voneinander isolierten Kontakten (insbesondere aus einem Metall) verbunden, über die eine Spannung an die Lagen angelegt werden kann. Die Kontakte befinden sich insbesondere außerhalb der Ausdehnung einer in der aktiven Sektion des Wellenleiters geführten Lichtwelle. Es wird insbesondere eine longitudinale Durchstrahlung der Lagen aus dem zweidimensionalen Material realisiert, in dem die Lagen parallel zur Längsrichtung des optischen Wellenleiters angeordnet werden.

Das erfindungsgemäße optoelektronische Bauelement kann auch mit einer Glasfaser gekoppelt sein, wobei eine Stirnseite der Glasfaser mit einer Facette des Bauelementes (des optische Wellenleiters) verbunden ist; z.B. per Kleb- oder Rastverbindung.

Beispielsweise wird das erfindungsgemäße Bauelement in einem Wellenlängenbereich von 0,4 μm bis 1,7 μm , 0,82 μm – 0,87 μm , 0,97 μm – 1,070 μm , 1,26 μm – 1,36 μm und/oder 1,5 μm – 1,65 μm betrieben.

In einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung ein optoelektronisches Bauelement, das insbesondere wie oben erläutert ausgebildet ist, mit

- einem optischen Wellenleiter, der mindestens eine aktive Sektion umfasst, die mindestens eine aus einem zweidimensionalen Material gebildete Lage aufweist, wobei
- die Lage aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern der aktiven Sektion oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern der aktiven Sektion angeordnet ist, und wobei
- die aktive Sektion ein Mantelmaterial aufweist, das das Kernmaterial zumindest teilweise umgibt, wobei
- der Brechungsindex eines den Wellenleiterkern der aktiven Sektion ausbildenden Kernmaterials bezogen auf sichtbares Licht im Bereich von 1,9 bis 2,5 und der Brechungsindex des Mantelmaterials im Bereich von 1,4 bis 1,55 liegt.

Bei dem Kernmaterial der aktiven Sektion handelt es sich zum Beispiel um ein Dielektrikum, das aus einem Nitrid, einem Oxid und/oder einem Silikat ausgebildet ist. Das Dielektrikum weist zum Beispiel Siliziumnitrid, Titandioxid, Hafniumdioxid, Hafniumsilikat, Zirkoniumsilikat, Zirkoniumdioxid und/oder Aluminiumdioxid auf oder ist aus diesen Materialien gebildet.

Darüber hinaus kann das Kernmaterial der aktiven Sektion eine Dicke von mindestens 50 nm, mindestens 100 nm oder mindestens 200 nm besitzen oder im Bereich von 50 bis 500 nm oder 100 bis 200 nm besitzen.

Gemäß einer anderen Ausgestaltung weist das Mantelmaterial der aktiven Sektion Siliziumdioxid und/oder ein Polymer und/oder das Mantelmaterial einer passiven Sektion des Wellenleiters Siliziumdioxid und/oder ein Polymer auf.

5

Das Kernmaterial einer passiven Sektion des Wellenleiters umfasst zum Beispiel ein Polymer (z.B. mit einem Brechungsindex zwischen 1,4 und 1,55) und/oder dotiertes Siliziumdioxid, und/oder das Mantelmaterial der passiven Sektion umfasst ein Polymer und/oder Siliziumdioxid. Das Polymer kann durch ein Acrylat, ein Ormocer, ein Spin-on-Glass-Polymer oder Silikon (jeweils z.B. mit einem Brechungsindex von 1,40 bis 1,55 oder 1,44 bis 1,49) ausgebildet sein.

10

Das optoelektronische Bauelement des zweiten Erfindungsaspekts kann selbstverständlich zusätzlich auch oben erläuterte Merkmale des optoelektronischen Bauelementes des ersten Erfindungsaspektes aufweisen. So umfasst der optische Wellenleiter neben der aktiven Sektion insbesondere auch eine passive Sektion. Möglich ist auch, dass zwei Lagen aus jeweils einem zweidimensionalen Material vorhanden sind, die elektrisch durch ein Dielektrikum voneinander isoliert sind. Des Weiteren können die oben erwähnten Materialien zur Ausbildung der Lage aus dem zweidimensionalen Material verwendet werden.

15

20

Umgekehrt kann das optoelektronische Bauelement des ersten Erfindungsaspektes Merkmale, die oben bezüglich des zweiten Erfindungsaspektes erläutert wurden, enthalten. Dies betrifft beispielsweise die in Bezug auf den zweiten Erfindungsaspekt genannten Kern- und Mantelmaterialien zur Ausbildung der passiven und der aktiven Sektion des Wellenleiters.

25

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes, insbesondere wie oben beschrieben, mit den Schritten:

- Erzeugen eines optischen Wellenleiters, der mindestens eine aktive und mindestens eine passive Sektion umfasst, wobei
- 30 - das Erzeugen des optischen Wellenleiters ein Anordnen mindestens einer aus einem zweidimensionalen Material gebildeten Lage zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern der aktiven Sektion oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern umfasst, wobei
- der optische Wellenleiter so erzeugt wird, dass der Brechungsindexunterschied bezogen auf dieselbe Wellenlänge zwischen einem den Wellenleiterkern der aktiven Sektion ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel der aktiven Sektion ausbildenden
- 35

Mantelmaterial größer ist als der Brechungsindexunterschied zwischen einem einen Wellenleiterkern der passiven Sektion ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel der passiven Sektion ausbildenden Mantelmaterial.

5 Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 schematisch eine seitliche Schnittansicht eines optoelektronischen Bauelementes gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;
- 10 Figur 2 das Bauelement aus Figur 1 in einer teilweise transparenten Ansicht von oben;
- Figur 3 einen Schnitt durch das Bauelement aus Figur 1 im Bereich der aktiven Sektion;
- 15 Figur 4 einen Schnitt durch das Bauelement aus Figur 1 im Bereich der passiven Sektion;
- Figur 5 schematisch eine Schnittansicht durch die aktive Sektion eines optoelektronischen Bauelementes gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung; und
- 20 Figur 6 eine Schnittansicht durch die passive Sektion des Bauelementes aus Figur 5.
- 25

Das in Figur 1 dargestellte erfindungsgemäße optoelektronische Bauelement 1 umfasst einen auf einem Substrat 10 angeordneten integriert-optischen Wellenleiter 11, wobei ein erstes Ende des optischen Wellenleiters 11 mit einer ersten Glasfaser 21 und an ein zweites Ende des Wellenleiters 11 mit einer zweiten Glasfaser 22 gekoppelt ist. Beispielsweise wird über die erste Glasfaser 21 eine Lichtwelle 20 (vertikal schraffierter Bereich in Figur 1) in den optischen Wellenleiter 11 ein- und über die zweite Glasfaser 22 aus dem Wellenleiter 11 ausgekoppelt.

30

Der optische Wellenleiter 11 weist eine aktive Sektion 112 und eine passive Sektion 111 auf, wobei sich im Ausführungsbeispiel der Figur 1 ein Teilabschnitt 111a der passiven Sektion 111 vor der aktiven Sektion 112, d.h. zwischen einer mit der ersten Glasfaser 21 gekoppelten Facette des Bauelementes 1 und der aktiven Sektion 112, und ein anderer Teilabschnitt 111b

35

hinter der aktiven Sektion 112, d.h. zwischen der aktiven Sektion 112 und einer mit der zweiten Glasfaser 22 gekoppelten Facette des Bauelementes 1, befindet.

Die aktive Sektion 112 des Wellenleiters 11 zeichnet sich dadurch aus, dass in ihren Wellenleiterkern 1121 zwei Lagen 31, 32, die jeweils aus einem zweidimensionalen Material (z.B. Graphen) bestehen, eingebettet sind, und zwar derart, dass sich ein Kernmaterial, aus dem der Wellenleiterkern 1121 der aktiven Sektion 112 besteht, auch zwischen den Lagen 31, 32 erstreckt und die Lagen 31, 32 elektrisch voneinander isoliert. Das Kernmaterial erstreckt sich also jeweils angrenzend an zwei einander gegenüberliegende Seiten der Lagen 31, 32.

Als aktive Sektion 112 wird insbesondere der Bereich des Wellenleiters 11 angesehen, in dem sich die Lagen 31, 32 befinden. Nichtsdestotrotz erstreckt sich das Kernmaterial des Wellenleiterkerns 1121 in einen Wellenleiterkern 1111 sowohl des vorderen als auch des hinteren Teilabschnitts 111a, 111b der passiven Sektion 111 hinein, wobei im Beispiel sowohl die Dicke als auch die Höhe des Kernmaterials kontinuierlich nach außen hin (von den Lagen 31, 32 weg) abnimmt. Diese spezielle laterale Strukturierung des Kernmaterials der aktiven Sektion ist insbesondere in Fig. 2 gut zu erkennen. Der ebenfalls lateral strukturierte Wellenleiterkern 1111 der passiven Sektion 111 erstreckt sich wiederum angrenzend an den Wellenleiterkern 1121 in die aktive Sektion 112 des Wellenleiters 11 hinein und bildet dort einen Wellenleitermantel 1122 der aktiven Sektion 112 aus. Die Verjüngung des Kernmaterials des Wellenleiterkerns 1121 in die passive Sektion 111 hinein dient zur Reduzierung von Kopplungsverlusten zwischen der passiven und der aktiven Sektion 111, 112.

Der Wellenleiterkern 1111 der passiven Sektion 111 ist von einem Wellenleitermantel 1112 umgeben, wobei sich das Mantelmaterial des Mantels 1112 durchgehend von dem vorderen Teilabschnitt 111a der passiven Sektion 111 über die aktive Sektion 112 bis zum Ende des hinteren Teilabschnitts 111b der passiven Sektion 111 erstreckt.

Die aktive Sektion 112 weist andere Lichtführungseigenschaften auf als die passive Sektion 111 des Wellenleiters 11. Insbesondere unterscheiden sich die Materialien der Wellenleitermäntel 1112 und 1122 der passiven und der aktiven Sektion 111, 112 und auch die Kernmaterialien der Wellenleiterkerne 1111 und 1121. Darüber hinaus sind diese Materialien so gewählt, dass der Brechungsindexunterschied zwischen dem Kernmaterial des Wellenleiterkerns 1121 und dem Material des Mantels 1122 der aktiven Sektion 112 größer ist als der Brechungsindexunterschied zwischen dem Material des Kerns 1111 und dem Material des Mantels 1112 und der passiven Sektion 111.

Insbesondere sind die Brechungsindexunterschiede der passiven und der aktiven Sektion 111, 112 so, dass die aktive Sektion 112 stark lichtführend und die passive Sektion schwach lichtführend ausgebildet sind. Dies hat zur Folge, dass die in dem optischen Wellenleiter 11 geführte Lichtwelle 20 in der passiven Sektion 111 eine größere Ausdehnung aufweist als in der aktiven Sektion 112, wie in Figur 1 dargestellt. Insbesondere ist die Ausdehnung der Lichtwelle 20 in den passiven Teilsektionen 111a, 111b jeweils vergleichbar mit der Ausdehnung der Lichtwelle in den Glasfasern 21, 22, so dass die Koppelverluste zwischen den Glasfasern 21, 22 und dem Wellenleiter 11 möglichst gering sind.

Aufgrund der starken Führung durch die aktive Sektion 112 des Wellenleiters 11 besitzt die Lichtwelle hier einen reduzierten Querschnitt, wodurch sie im zentralen Bereich der aktiven Sektion 112 und damit im Bereich der Lagen 31, 32 aus dem zweidimensionalen Material eine höhere Intensität aufweist. Entsprechend ergibt sich auch eine stärkere Wirkung der Lichtwelle auf die Lagen 31, 32 und damit eine bessere Effizienz der Wechselwirkung zwischen der Lichtwelle und den Lagen 31, 32. Eine laterale Führung der Lichtwelle in der aktiven Sektion 112 wird dadurch erzeugt, dass der Wellenleiterkern 1121 eine Rippe 1123 ausbildet. An die Rippe 1123 grenzt seitlich das Material des Mantels 1122 an; vgl. Figur 3, die einen Schnitt senkrecht zum Wellenleiter 11 durch die aktive Sektion 112 zeigt. Der Wellenleiterkern 1111 des passiven Bereichs 111 weist hingegen einen zumindest näherungsweise rechteckigen oder quadratischen Querschnitt auf, wie in dem Schnitt durch die passive Sektion 111 in Fig. 4 dargestellt.

Bei dem Kernmaterial des Wellenleiterkerns 1121 der aktiven Sektion 112 handelt es sich beispielsweise um ein Dielektrikum (z.B. Siliziumnitrid), wobei sich das Kernmaterial insbesondere auch zwischen den beiden Lagen 31, 32 erstreckt. Denkbar ist allerdings auch, dass als elektrisch isolierendes Material zwischen den Lagen 31 und 32 ein anderes Dielektrikum verwendet wird als für den Rest des Wellenleiterkerns 1121. Als Material des Mantels 1112, das identisch zu dem Material des Kerns 1111 der passiven Sektion 111 ist, kommt z.B. ein Polymer in Frage. Der Mantel 1112 der passiven Sektion 111 wird z.B. ebenfalls aus einem Polymer gebildet. Insbesondere werden Materialien verwendet, mit denen sich ein Brechungsindex (bezogen auf sichtbares Licht oder eine sonstige Betriebswellenlänge des optoelektronischen Bauelementes) des Materials des Kerns 1121 der aktiven Sektion 112 im Bereich von 1,9 bis 2,5 und ein Brechungsindex des Mantelmaterials der aktiven Sektion 112 im Bereich von 1,4 bis 1,55 ergibt.

- Wie in der Draufsicht des optoelektronischen Bauelementes 1 in Figur 2 und in Figur 3 gezeigt, sind die Lagen 31, 32 aus dem zweidimensionalen Material mit Metallkontakten 41, 42 versehen, über die eine elektrische Spannung an die Lagen 31, 32 ankoppelbar und auf diese Weise ein Lichtmodulator realisierbar ist. Die Kontakte 41, 42 sind jeweils auf einem Abschnitt der Lagen 31, 32 angeordnet, der aus dem Wellenleiterkern seitlich heraus ragt, wobei sich oberhalb der Kontakte 41, 42 Aussparungen 1113 in dem Wellenleitermantel 1112 der passiven Sektion befinden, über die die Kontakte 41, 42 zugänglich sind. Die Metallkontakte 41, 42 haben so ausreichend Abstand zur geführten Welle um Lichtverluste zu vermeiden.
- 5
- 10 Eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen optoelektronischen Bauelementes 1 ist in den Figur 5 und 6 illustriert. Auch dieses Bauelement weist eine passive und eine aktive Sektion 111, 112 auf, wobei Figur 5 einen Schnitt durch die aktive Sektion 112 und Figur 6 einen Schnitt durch die passive Sektion 111 zeigt. Anders als in den vorhergehenden Ausführungsbeispielen ist nur eine Lage 31 aus einem zweidimensionalen Material vorhanden, die sich zudem nicht in dem Wellenleiterkern 1121 der aktiven Sektion 112 befindet, sondern an-
- 15 grenzend zu dem Wellenleiterkern 1121 angeordnet ist. Genauer erstreckt sich die Lage 31 über eine Rippe 1123 des Wellenleiterkerns 1121 hinweg und verläuft jeweils seitlich der Rippe 1123 bis zu Kontakten 41, 42, über die z.B. ein in der Lage 31 erzeugte Fotostrom messbar und somit das Bauelement 1 als Fotodetektor betreibbar ist. Die Kontakte 41, 42 sind so positioniert, dass sie außerhalb der in der aktiven Sektion 112 geführten optischen Welle 20 liegen.
- 20

* * * * *

Patentansprüche

1. Optoelektronisches Bauelement, mit

- einem optischen Wellenleiter (11), der mindestens eine passive und mindestens eine aktive Sektion (111, 112) umfasst, wobei
- die aktive Sektion (112) mindestens eine aus einem zweidimensionalen Material gebildete Lage (31, 32) aufweist, wobei die Lage (31, 32) aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) angeordnet ist,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Brechungsindexunterschied bezogen auf dieselbe Wellenlänge zwischen einem den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Kernmaterial und einem Wellenleiternmantel (1122) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Mantelmaterial größer ist als der Brechungsindexunterschied zwischen einem Wellenleiterkern (1111) der passiven Sektion (111) ausbildenden Kernmaterial und einem Wellenleiternmantel (1112) der passiven Sektion (111) ausbildenden Mantelmaterial (1112).

2. Optoelektronisches Bauelement nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kernmaterial der aktiven Sektion (112) zur lateralen Führung einer in den Wellenleiter (11) eingekoppelten Lichtwelle (20) strukturiert ist.

3. Optoelektronisches Bauelement nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest die aktive Sektion einen einmodigen Wellenleiter ausbildet.

4. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lage aus zweidimensionalem Material zumindest in einer Richtung aus dem Wellenleiterkern seitlich heraus ragt und die herausragende Lage mit Abstand zur geführten optischen Welle elektrisch kontaktiert ist.

5. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich das Kernmaterial der aktiven Sektion (112) von dem Kernmaterial der passiven Sektion (111) unterscheidet, und/oder sich das Mantelmaterial der aktiven Sektion (112) von dem Mantelmaterial der passiven Sektion (111) unterscheidet.

6. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aktive Sektion (112) des optischen Wellenleiters (11) stark führend und die passive Sektion (111) des optischen Wellenleiters (11) schwach führend ausgebildet ist.
- 5
7. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Brechungsindexunterschied zwischen dem Kern- und Mantelmaterial der aktiven Sektion (112) mindestens 0,2, mindestens 0,3 oder mindestens 0,4 beträgt, und/oder der Brechungsindexunterschied zwischen dem Kern- und Mantelmaterial der passiven Sektion (111) höchstens 0,1 oder höchstens 0,05 beträgt.
- 10
8. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aktive Sektion (112) des Wellenleiters (11) so ausgebildet ist, dass die dort geführte Lichtwelle einen Durchmesser von weniger als 3 μm oder weniger als 2 μm besitzt, und/oder die passive Sektion (111) des Wellenleiters (11) so ausgebildet ist, dass die dort geführte Lichtwelle (20) einen Durchmesser von mindestens 3 μm oder mindestens 5 μm aufweist.
- 15
9. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich das Kernmaterial der aktiven Sektion (112) in die passive Sektion hinein erstreckt, wobei die Ausdehnung des Kernmaterials senkrecht zur Längsrichtung des optischen Wellenleiters (11) mit der Entfernung von der aktiven Sektion (112) abnimmt.
- 20
10. Optoelektronisches Bauelement nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass Ausdehnung des Kernmaterials kontinuierlich mit der Entfernung von der aktiven Sektion über eine Strecke von mindestens 30 μm oder mindestens 50 μm abnimmt.
- 25
11. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Mantelmaterial der aktiven Sektion (112) zumindest einen Teil des Kernmaterials der passiven Sektion (111) ausformt.
- 30
12. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweidimensionale Material aus einer Atomlage oder aus maximal zehn Atomlagen besteht.
- 35
13. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweidimensionale Material aus Graphen, triazinbasiertem graphitischem Kohlenstoffnitrid, Germanen, Molybdändisulfid, Molybdändiselenid, Silicen

und/oder schwarzer Phosphor gebildet ist oder zumindest eines dieser Materialien aufweist.

- 5 14. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die aktive Sektion (111) mindestens zwei Lagen (31, 32) aus jeweils einem zweidimensionalen Material aufweist, die elektrisch durch ein Dielektrikum voneinander isoliert sind.
- 10 15. Optoelektronisches Bauelement, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit
- einem optischen Wellenleiter (11), der mindestens eine aktive Sektion (112) umfasst, die mindestens eine aus einem zweidimensionalen Material gebildete Lage (31, 32) aufweist, wobei
 - 15 - die Lage (31, 32) aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) angeordnet ist, und wobei
 - die aktive Sektion (112) ein Mantelmaterial aufweist, das das Kernmaterial zumindest teilweise umgibt,
- 20 **dadurch gekennzeichnet**, dass
- der Brechungsindex eines den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Kernmaterials bezogen auf sichtbares Licht im Bereich von 1,9 bis 2,5 und der
- 25 Brechungsindex des Mantelmaterials im Bereich von 1,4 bis 1,55 liegt.
16. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich bei dem Kernmaterial der aktiven Sektion (112) um ein Dielektrikum handelt, das aus einem Nitrid, einem Oxid und/oder einem Silikat ausgebildet ist.
- 30
17. Optoelektronisches Bauelement nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass bei dem Dielektrikum um Siliziumnitrid, Titandioxid, Hafniumdioxid, Hafniumsilikat, Zirkoniumsilikat, Zirkoniumdioxid und/oder Aluminiumdioxid handelt.
- 35
18. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kernmaterial der aktiven Sektion (112) eine Dicke von mindestens 50 nm, mindestens 100 nm oder mindestens 200 nm besitzt.

19. Optoelektronisches Bauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Mantelmaterial der aktiven Sektion (112) Siliziumdioxid und/oder ein Polymer und/oder das Mantelmaterial einer passiven Sektion (111) des Wellenleiters Siliziumdioxid und/oder ein Polymer umfasst.
20. Optoelektronisches Bauelement nach einem der Ansprüche 15 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kernmaterial einer passiven Sektion (112) des Wellenleiters (11) ein Polymer und/oder dotiertes Siliziumdioxid umfasst, und/oder das Mantelmaterial der passiven Sektion (111) ein Polymer und/oder Siliziumdioxid umfasst.
21. Optoelektronisches Bauelement nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Polymer durch ein Acrylat, ein Ormocer, ein Spin-on-Glass-Polymer oder Silikon ausgebildet ist.
22. Optoelektronisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lage (31, 32) aus dem zweidimensionalen Material zumindest teilweise an eine Ober- oder Unterseite des Wellenleiterkerns (1121) der aktiven Sektion angrenzt.
23. Verfahren zum Herstellen eines optoelektronischen Bauelementes, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit den Schritten:
- Erzeugen eines optischen Wellenleiters (11), der mindestens eine passive und mindestens eine aktive Sektion (111, 112) umfasst, wobei
 - das Erzeugen des optischen Wellenleiters (11) ein Anordnen mindestens einer aus einem zweidimensionalen Material gebildeten Lage (31, 32) zumindest teilweise in einem Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) oder zumindest teilweise angrenzend an den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) umfasst,
- dadurch gekennzeichnet**, dass
- der optische Wellenleiter (11) so erzeugt wird, dass der Brechungsindexunterschied bezogen auf dieselbe Wellenlänge zwischen einem den Wellenleiterkern (1121) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel (1122) der aktiven Sektion (112) ausbildenden Mantelmaterial größer ist als der Brechungsindexun-

terschied zwischen einem einen Wellenleiterkern (1111) der passiven Sektion (111) ausbildenden Kernmaterial und einem einen Wellenleitermantel (1112) der passiven Sektion (111) ausbildenden Mantelmaterial (1112).

FIG 2

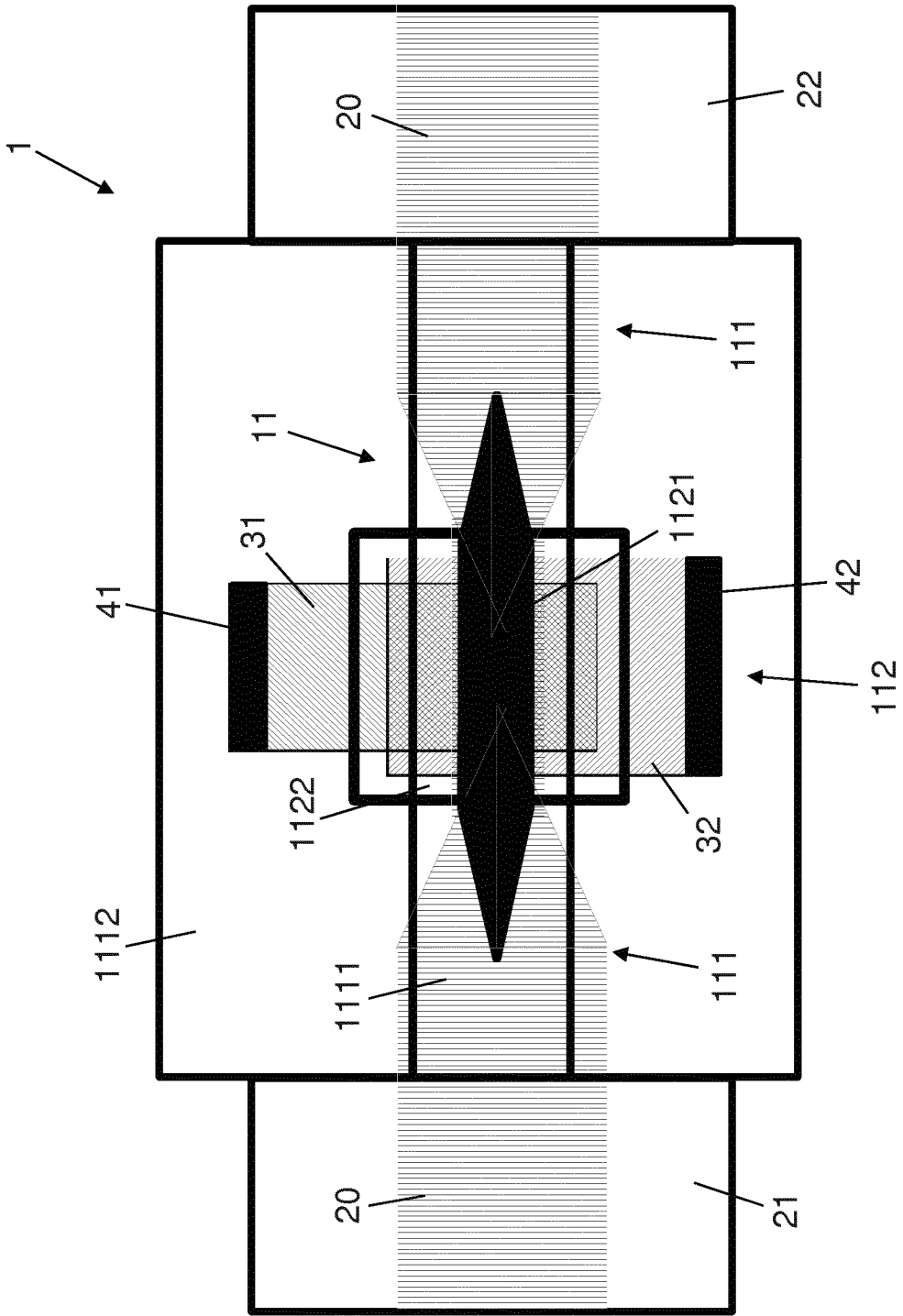


FIG 4

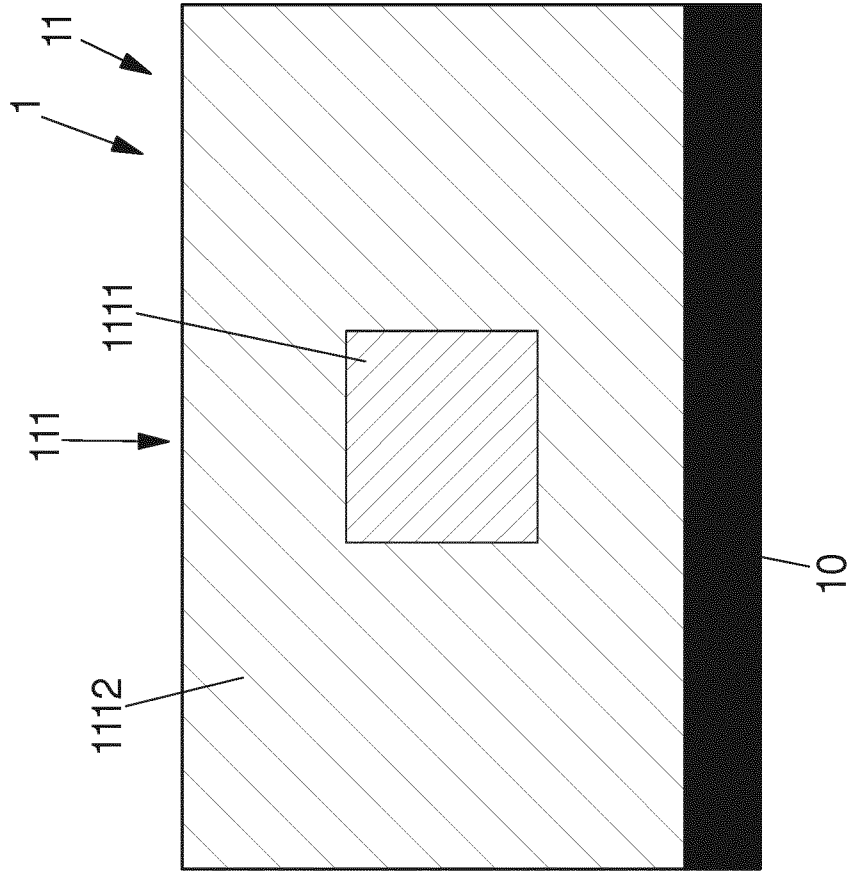


FIG 3

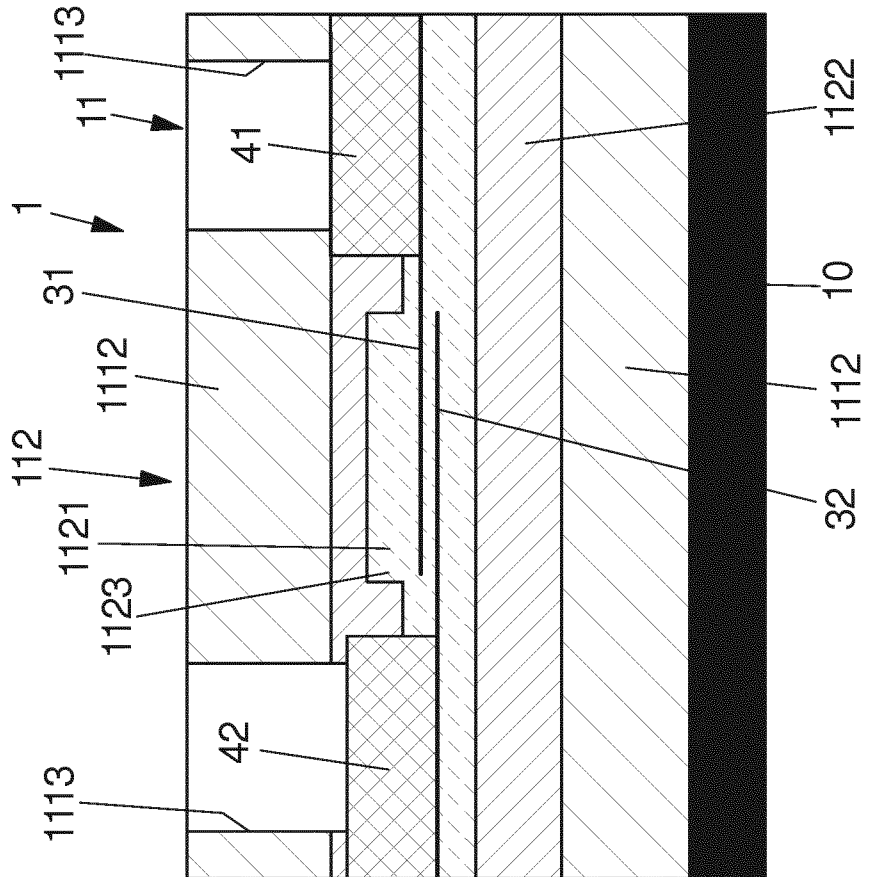


FIG 5

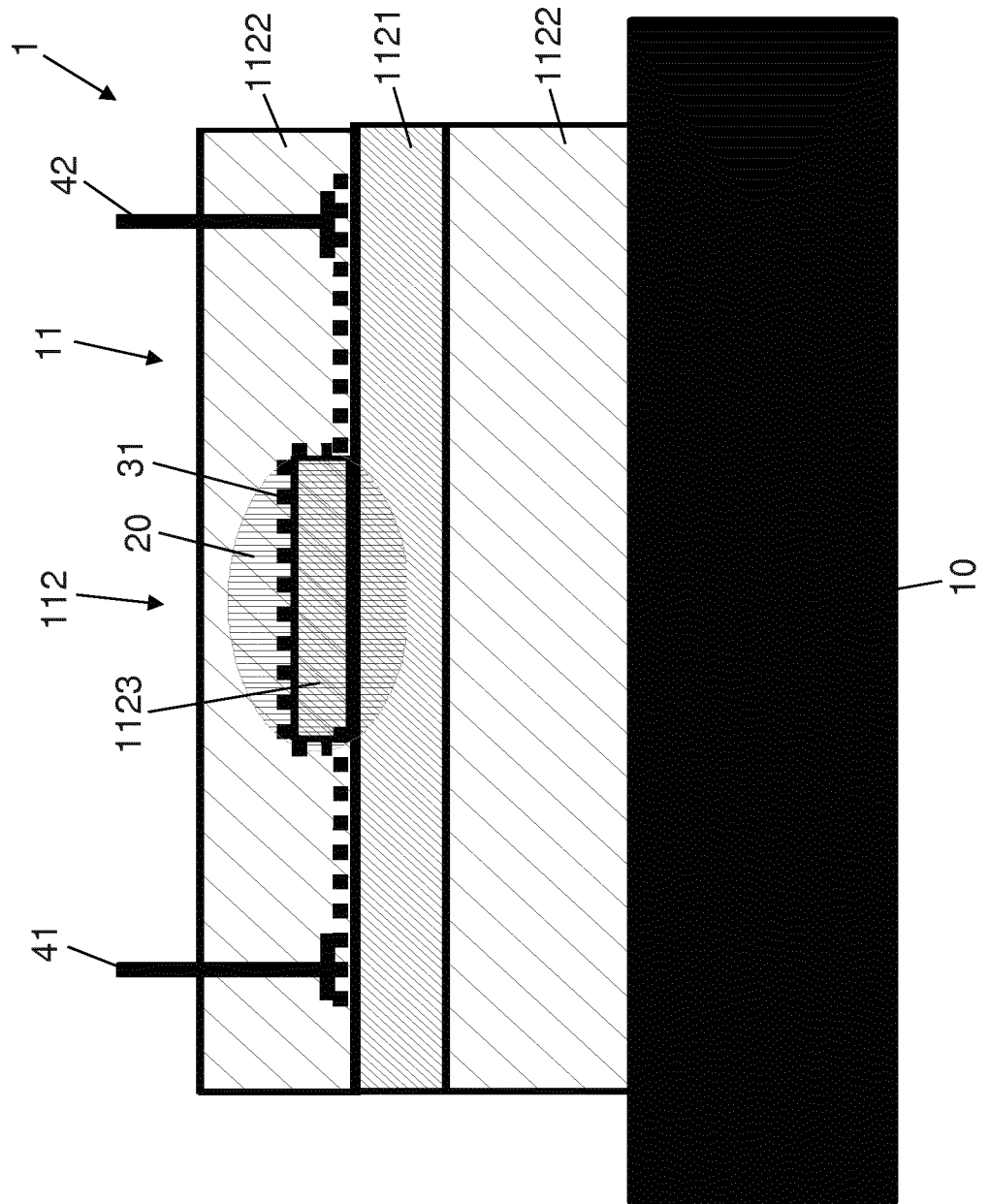


FIG 6

