

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902065015A1

Publication Date

20140102

Applicant

STMICROELECTRONICS S.R.L.

Title

DISPOSITIVO OPTOELETTRONICO INTEGRATO CON GUIDA D'ONDA E
RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"DISPOSITIVO OPTOELETTRONICO INTEGRATO CON GUIDA D'ONDA E
RELATIVO PROCEDIMENTO DI FABBRICAZIONE"

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana

con sede: VIA C. OLIVETTI, 2

AGRATE BRIANZA (MB)

Inventori: PAGANI Alberto, MOTTA Alessandro, LOI Sara

* * *

La presente invenzione è relativa ad un dispositivo optoelettronico integrato con guida d'onda e al relativo procedimento di fabbricazione.

Come è noto, sono oggi disponibili numerosi dispositivi atti a comunicare con altri dispositivi mediante impiego di radiazione elettromagnetica, ai quali ci si riferisce in genere come ai dispositivi optoelettronici.

Ad esempio, il brevetto US7352066 descrive una struttura includente un emettitore optoelettronico, uno strato privo di circuiti elettronici (noto come "interposer") ed una guida d'onda orizzontale. In particolare, l'interposer è interposto tra l'emettitore optoelettronico e la guida d'onda orizzontale; inoltre, all'interno dell'interposer è formato un foro passante,

anche noto come via, il quale funge da guida d'onda verticale. In uso, la radiazione elettromagnetica emessa dall'emettitore optoelettronico si accoppia inizialmente alla guida d'onda verticale e successivamente si accoppia alla guida d'onda orizzontale. La radiazione elettromagnetica in uscita dalla guida d'onda orizzontale può quindi essere ricevuta, ad esempio, da un ulteriore dispositivo provvisto di un fotorivelatore, realizzando così un circuito ottico, attraverso il quale è possibile trasmettere dati per via ottica. La struttura descritta in US7352066 consente dunque di accoppiare l'emettitore optoelettronico ad una guida d'onda diretta in direzione perpendicolare rispetto alla direzione di emissione dell'emettitore optoelettronico, tuttavia essa non consente di realizzare sistemi tridimensionali ("tridimensional", 3D) in cui due o più dispositivi elettronici integrati sono disposti l'uno sopra l'altro e comunicano otticamente.

Il brevetto US6090636 descrive, invece, un dispositivo che include un primo substrato di materiale semiconduttore, al cui interno sono formati due circuiti elettronici funzionali; inoltre, all'interno del primo substrato è formata una via ottica, la quale attraversa completamente il primo substrato. Al di sopra del primo substrato è incollato un trasmettitore ottico, il quale è formato in un secondo substrato, tale secondo substrato essendo formato

da un materiale semiconduttore differente da quello che forma il primo substrato. Al di sotto del primo substrato è incollato un ricevitore ottico, il quale è formato in un terzo substrato, tale terzo substrato essendo formato da un materiale semiconduttore differente da quello che forma il primo substrato. Pertanto, né il trasmettitore ottico né il ricevitore ottico sono integrati con i due circuiti elettronici funzionali.

Il dispositivo descritto in US6090636 forma dunque un sistema tridimensionale formato da non più di due dispositivi optoelettronici e da non più di tre substrati; pertanto, il dispositivo descritto in US6090636 non consente di formare sistemi tridimensionali basati sulla comunicazione ottica ed includenti un numero maggiore di dispositivi.

Scopo della presente invenzione è fornire un dispositivo optoelettronico che risolva almeno in parte gli inconvenienti dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un dispositivo optoelettronico ed un metodo di fabbricazione come definiti, rispettivamente, nelle rivendicazioni 1 e 24.

Per una migliore comprensione della presente invenzione vengono ora descritte forme di realizzazione preferite, a puro titolo di esempi non limitativi, con

riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- le figure 1, 2, 4, 6-10, 13-16, 18 e 21-24 mostrano in modo schematico sezioni trasversali di forme di realizzazione del presente dispositivo optoelettronico;

- la figura 3 mostra una sezione trasversale della forma di realizzazione mostrata in figura 2, presa lungo una linea di sezione III-III indicata in figura 2;

- la figura 5 mostra schematicamente una sezione trasversale di una porzione della forma di realizzazione mostrata in figura 4;

- la figura 11 mostra schematicamente una vista dall'alto di una porzione di una ulteriore forma di realizzazione del presente dispositivo optoelettronico;

- la figura 12 mostra in modo schematico una sezione trasversale di una porzione di una forma di realizzazione del presente dispositivo optoelettronico;

- la figura 17 mostra una vista prospettica di una porzione di una ulteriore forma di realizzazione del presente dispositivo optoelettronico;

- le figure 19a-19c mostrano schematicamente sezioni trasversali di porzioni di forme di realizzazione del presente dispositivo optoelettronico;

- la figura 20 mostra una vista dall'alto della porzione mostrata in figura 19a, presa lungo una linea di sezione XX-XX indicata in figura 19a;

- la figura 25 mostra, a livello di principio, uno schema a blocchi di un sistema optoelettronico includente due dispositivi optoelettronici;

- le figure 26a-26h mostrano sezioni trasversali di una medesima forma di realizzazione, durante fasi successive di un processo di fabbricazione;

- le figure 27a-27l mostrano sezioni trasversali di una medesima forma di realizzazione, durante fasi successive di un processo di fabbricazione; e

- le figure 28a-28h mostrano sezioni trasversali di una medesima forma di realizzazione, durante fasi successive di un processo di fabbricazione.

La figura 1 mostra un primo dispositivo optoelettronico 1, delimitato superiormente ed inferiormente da, rispettivamente, una superficie superiore S_1 e una superficie inferiore S_2 .

Il primo dispositivo optoelettronico 1 comprende un corpo di materiale semiconduttore 2, il quale definisce la superficie inferiore S_2 , e una regione superiore 4, la quale è disposta al di sopra del corpo semiconduttore 2 e definisce la superficie superiore S_1 . In modo di per sé noto, il corpo semiconduttore 2 comprende un substrato 40 (figura 2) di materiale semiconduttore ed eventualmente uno o più strati epitassiali (non mostrati); inoltre, la regione superiore 4 comprende una o più metallizzazioni

(non mostrate) disposte eventualmente su più livelli e collegate tramite vie, nonché uno o più strati dielettrici (non mostrati).

Più in particolare, il corpo semiconduttore 2 è delimitato superiormente da una superficie intermedia S_3 ; inoltre, il corpo semiconduttore 2 è delimitato inferiormente dalla superficie inferiore S_2 .

Il primo dispositivo optoelettronico 1 presenta una via ottica passante 8, cioè un foro di tipo passante al cui interno può verificarsi la propagazione guidata di radiazione elettromagnetica. La via ottica passante 8 si estende tra la superficie superiore S_1 e la superficie inferiore S_2 e, dunque, attraversa sia la regione superiore 4, sia il corpo semiconduttore 2. La via ottica passante 8 è interamente riempita da un nucleo ("core") 10, il quale è formato da un materiale trasparente ad una lunghezza d'onda operativa λ . A titolo puramente esemplificativo, la via ottica passante 8 può avere, in vista dall'alto, forma circolare.

La porzione di via ottica passante 8 che attraversa la regione superiore 4 è rivestita da un primo strato di rivestimento 12, il quale riveste dunque una corrispondente porzione superiore 11a del nucleo 10, con cui è a contatto diretto. Il primo strato di rivestimento 12 è inoltre a contatto diretto con la regione superiore 4. Come mostrato

in figura 1, il primo strato di rivestimento 12 può estendersi tra la superficie superiore S_1 e la superficie intermedia S_3 .

La porzione di via ottica passante 8 che attraversa il corpo semiconduttore 2 è in parte rivestita da un secondo strato di rivestimento 14, il quale riveste dunque una corrispondente porzione inferiore 11b del nucleo 10, con cui è a contatto diretto. Il secondo strato di rivestimento 14 è inoltre a contatto diretto con il corpo semiconduttore 2, ma è fisicamente separato del primo strato di rivestimento 12, in maniera tale per cui il nucleo 10 comprende una porzione non rivestita né dal primo né dal secondo strato di rivestimento 12, 14, la quale è interposta tra la porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b, ed alla quale ci si riferisce in seguito come alla porzione non rivestita 11c (figura 2).

Il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 sono formati, ad esempio, da un medesimo materiale, il quale ha un indice di rifrazione tale per cui il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 definiscono, insieme rispettivamente alla porzione superiore 11a ed alla porzione inferiore 11b del nucleo 10, una prima ed una seconda guida d'onda verticale 22, 24, al cui interno può verificarsi la propagazione guidata di radiazione elettromagnetica alla lunghezza d'onda operativa λ . In

altre parole, assumendo di accoppiare alla prima ed alla seconda guida d'onda verticale 22, 24 radiazione alla lunghezza d'onda operativa λ , tale radiazione, alla quale ci si riferisce in seguito come al segnale ottico, si propaga all'interno della prima e della seconda guida d'onda verticale 22, 24 in modo cosiddetto guidato, sperimentando il fenomeno della riflessione totale. A tal fine, indicando con n_1 l'indice di rifrazione del materiale che forma il nucleo 10 e con n_2 l'indice di rifrazione del materiale che forma il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14, si ha che $n_1 > n_2$.

A titolo puramente esemplificativo, il corpo semiconduttore 2 può essere formato da silicio monocristallino, il quale, per lunghezze d'onda nell'infrarosso (cioè, comprese circa tra 1.1 μ m e 1.6 μ m), ha un indice di rifrazione pari a circa 3,5 ed esibisce perdite dell'ordine di circa 0,1dB/cm. E' comunque possibile adottare materiali semiconduttori differenti. In particolare, la scelta del materiale che forma il nucleo 10 è fatta in funzione della lunghezza d'onda operativa λ .

Ancora a titolo puramente esemplificativo, per lunghezze d'onda nell'infrarosso, il nucleo 10 può essere formato, oltre che da silicio monocristallino, da silicio policristallino o da silicio amorfo, oppure ancora da un polimero quale il cosiddetto SU-8. Sempre a titolo

esemplificativo, nel caso di lunghezze d'onda nel visibile e nell'infrarosso, il nucleo 10 può essere formato da ossido di alluminio Al_2O_3 o da ossinitruro di silicio SiON , oppure ancora da un polimero quale il cosiddetto SU-8.

A titolo puramente esemplificativo, per lunghezze d'onda nell'infrarosso, il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 possono essere formati da biossido di silicio SiO_2 , oppure da ossido di alluminio Al_2O_3 , oppure da ossinitruro di silicio SiON . Sempre a titolo esemplificativo, per lunghezze d'onda nel visibile e nell'infrarosso, il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 possono essere formati da biossido di silicio SiO_2 .

All'interno del corpo semiconduttore 2 è formato un componente optoelettronico. In particolare, nella forma di realizzazione mostrata in figura 1 è formato un primo fotodiodo 30, il quale è disposto in maniera tale da ricevere il segnale ottico. Sebbene non mostrato in figura 1, il primo fotodiodo 30 è collegato ad un circuito elettronico di tipo di per sé noto, formato all'interno del corpo semiconduttore 2 ed atto ad elaborare il segnale elettrico generato dal primo fotodiodo 30.

In maggior dettaglio, secondo una forma di realizzazione illustrata in figura 2, il primo fotodiodo 30 è formato da una prima sacca ("well") 32, formata da una

corrispondente porzione del corpo semiconduttore 2, drogata ad esempio P ed avente ad esempio la forma, in vista dall'altro, di una corona circolare. Inoltre, il primo fotodiodo 30 è formato da una seconda sacca 34, formata da una corrispondente porzione del corpo semiconduttore 2, drogata ad esempio N ed avente sostanzialmente la forma, in vista dall'altro, di una corona circolare.

Più in particolare, assumendo che il nucleo 10 abbia forma cilindrica con raggio r_1 e che il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 abbiano, in vista dall'alto, una medesima forma di corona circolare con raggi $r_2=r_1$ e $r_3>r_2$, si ha che la corona circolare definita dalla prima sacca 32 ha raggi r_4 e r_5 , con $r_5>r_4$, mentre la corona circolare definita dalla seconda sacca 34 ha raggi r_6 e r_7 , con $r_7>r_6$. Inoltre, a titolo puramente esemplificativo, nella forma di realizzazione mostrata in figura 2 si verifica che $r_4\approx r_3$ e $r_4<r_6<r_7<r_5$; indicativamente r_1 può essere ad esempio compreso tra $10\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$, lo spessore complessivo del primo dispositivo optoelettronico 1 essendo ad esempio compreso tra $50\mu\text{m}$ e $200\mu\text{m}$. Inoltre, sempre a titolo puramente esemplificativo, il substrato 40 è drogato P, con un livello di drogaggio superiore al livello di drogaggio della prima sacca 32. Sempre a titolo puramente esemplificativo, in figura 2 sono altresì mostrati un primo ed un secondo collegamento conduttivo 42, 44, i quali sono

disposti nella regione superiore 4 ed assolvono, in modo di per sé noto, la funzione di consentire di polarizzare inversamente la giunzione G definita dalla prima e dalla seconda sacca 32, 34.

Secondo la forma di realizzazione illustrata in figura 2, la prima sacca 32 si estende nel corpo semiconduttore 2 a partire dalla superficie intermedia S_3 ; la seconda sacca 34 si estende anch'essa nel corpo semiconduttore 2, a partire dalla superficie intermedia S_3 , ed è circondata inferiormente e lateralmente dalla prima sacca 32. La prima e la seconda sacca 32, 34 circondano il nucleo 10, da cui sono fisicamente separate.

In maggior dettaglio, assumendo un riferimento Cartesiano xyz tale per cui la via ottica passante 8 si estende parallelamente all'asse z, e la superficie superiore S_1 e la superficie inferiore S_2 si estendono in piani paralleli agli assi x e y, la prima sacca 32 ha uno spessore h, misurato lungo l'asse z. Inoltre, il secondo strato di rivestimento 14 dista una distanza pari allo spessore h dalla superficie intermedia S_3 ; equivalentemente, la porzione non rivestita 11c ha uno spessore pari ad h. Pertanto, indicando con S_c la superficie laterale del nucleo 10, la prima sacca 32 non contatta direttamente la superficie laterale S_c . Infatti, il corpo semiconduttore 2 definisce, tra la prima sacca 32

e la superficie laterale S_c , una porzione di disaccoppiamento 46, la quale ha uno spessore pari ad h ed è appunto interposta tra la prima sacca 32 e la superficie laterale S_c ; la porzione di disaccoppiamento 46 circonda lateralmente la porzione non rivestita 11c. Tale forma di realizzazione può dunque essere fabbricata senza che le operazioni di attacco (descritte in seguito) atte a formare la via ottica passante 8 coinvolgano il primo fotodiodo 30; pertanto, si evitano possibili contaminazioni del primo fotodiodo 30.

Come mostrato in figura 4, è comunque possibile che la porzione di disaccoppiamento 46 sia assente, e dunque che la prima sacca 32 sia disposta a contatto con la superficie laterale S_c , al fine di ridurre eventuali perdite di accoppiamento del primo fotodiodo 30 con il nucleo 10. Più in particolare, secondo tale forma di realizzazione, anche la seconda sacca 34 è a contatto diretto con la superficie laterale S_c del nucleo. Sebbene non mostrato in figura 4, tra il primo fotodiodo 30 ed il nucleo 10 può comunque essere presente uno strato protettivo, trasparente alla lunghezza d'onda operativa λ .

Come mostrato in maggior dettaglio in figura 5, con riferimento ancora alla forma di realizzazione mostrata in figura 4, e nell'ipotesi di segnale ottico che si propaga nel nucleo 10 a partire dalla superficie superiore S_1 ed in

direzione della superficie inferiore S_2 , si verifica che il rapporto tra la frazione di segnale ottico che viene assorbita dal primo fotodiodo 30 e la frazione di segnale ottico che giunge alla superficie inferiore S_2 è proporzionale in prima approssimazione al rapporto h/T , dove T è il periodo di propagazione del segnale ottico. In particolare, $T=2\pi \cdot n_1 \cdot \sin\theta/\lambda$, dove θ (figura 1) è l'angolo con cui il segnale ottico incide sulla superficie superiore S_1 , tale angolo di incidenza essendo superiore all'angolo critico definito dai materiali con cui sono formati il nucleo 10 ed il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14. In particolare, in figura 5 è anche mostrata una regione di svuotamento 50, la quale si stabilisce all'interfaccia tra la prima e la seconda sacca 32, 34, estendendosi in parte attraverso queste ultime; la regione di svuotamento 50 ha complessivamente uno spessore pari a w , con $w < h$. Al fine di ottimizzare l'accoppiamento tra la via ottica passante 8 ed il primo fotodiodo 30, è possibile progettare la prima e la seconda sacca 32, 34 in modo che la regione di svuotamento 50 abbia un indice di rifrazione sostanzialmente uguale all'indice di rifrazione n_1 del nucleo 10, in modo da prevenire effetti di riflessione all'interfaccia tra la regione di svuotamento 50 ed il nucleo 10. Inoltre, è possibile disporre, all'interfaccia tra la regione di svuotamento 50 ed il nucleo 10, uno

strato di materiale antiriflesso (non mostrato).

Secondo una differente forma di realizzazione, mostrata in figura 6, il primo fotodiodo 30 ostruisce la via ottica passante 8, in maniera tale per cui la porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b del nucleo 10 sono tra loro separate. In pratica, le summenzionate prima e seconda guida d'onda verticale 22, 24 definiscono, rispettivamente, una prima ed una seconda via ottica cieca, tra loro separate.

In uso, assumendo che il segnale ottico si propaghi ancora a partire dalla superficie superiore S_1 ed in direzione della superficie inferiore S_2 , parte del segnale ottico viene assorbita dal primo fotodiodo 30, il quale genera un corrispondente segnale elettrico, mentre parte attraversa il primo fotodiodo 30 senza interagire con quest'ultimo. A tal proposito, la frazione di segnale ottico che viene assorbita dal primo fotodiodo 30 è proporzionale a $1-e^{-\alpha w}$, dove α è il coefficiente di assorbimento, che dipende dalla lunghezza d'onda operativa λ e dal materiale semiconduttore che forma il primo fotodiodo 30.

Come mostrato in figura 7, è inoltre possibile che il primo fotodiodo 30 sia cavo, cioè definisca una cavità passante 60, avente forma ad esempio cilindrica con raggio $r_c < r_1$ e disposta, ad esempio, allineata alla porzione

superiore 11a ed alla porzione inferiore 11b del nucleo 10. La cavità passante 60 può essere riempita del medesimo materiale di cui è formato il nucleo 10. La frazione di segnale ottico che passa attraverso la cavità passante 60 subisce un'attenuazione sostanzialmente nulla. Sebbene non mostrato, secondo tale forma di realizzazione è possibile che la porzione inferiore 11b del nucleo 10 sia formata del medesimo materiale semiconduttore di cui è formato il substrato 40 del corpo semiconduttore 2, con conseguente semplificazione del processo di fabbricazione, descritto in seguito.

Come mostrato in figura 8, è altresì possibile che tra la prima guida d'onda verticale 22 ed il primo fotodiodo 30 sia presente una prima regione intermedia 62, la quale si estende al di sopra della superficie intermedia S_3 . Inoltre, tra il primo fotodiodo 30 e la seconda guida d'onda verticale 24 può essere formata una seconda regione intermedia 64, la quale assolve la funzione di prevenire eventuali danneggiamenti della struttura cristallina del primo fotodiodo 30 durante le fasi di fabbricazione.

La porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b del nucleo 10, la prima e la seconda regione intermedia 62, 64 e lo stesso primo fotodiodo 30 definiscono un cammino ottico OP, il quale è in parte di tipo guidato e si estende tra la superficie superiore S_1 e la superficie inferiore S_2

del primo dispositivo optoelettronico 1, attraversando il corpo semiconduttore 2. Il cammino ottico OP accoppia otticamente il primo fotodiodo 30 ad una prima ed una seconda porzione di spazio libero disposte rispettivamente al di sopra della superficie superiore S_1 ed al di sotto della superficie inferiore S_2 , cioè consente al primo fotodiodo 30 di ricevere eventuali segnali luminosi che provengono da tali prima e seconda porzione di spazio libero. A tal fine, il cammino ottico OP accoppia il primo fotodiodo 30 sia alla prima che alla seconda porzione di spazio libero introducendo, rispettivamente, una prima ed una seconda attenuazione (alla lunghezza d'onda operativa λ), le quali, nel caso di nucleo 10 formato da silicio e per lunghezze d'onda nell'infrarosso, sono in prima approssimazione trascurabili, cioè sono inferiori a 0,1dB. Inoltre, nella forma di realizzazione mostrata in figura 8, il cammino ottico OP è diretto lungo l'asse z, cioè le rispettive porzioni guidate (nella fattispecie, la prima e la seconda guida d'onda verticale 22, 24) hanno assi paralleli all'asse z.

Come mostrato in figura 9, sono altresì possibili forme di realizzazione in cui il primo fotodiodo 30 comprende una prima ed una seconda zona 31a, 31b, le quali hanno drogaggi opposti e sono disposte l'una laterale rispetto all'altra, a contatto diretto. In particolare, sia

la prima che la seconda zona 31a, 31b si estendono a partire dalla superficie intermedia S_3 . Ancora più in particolare, la prima e la seconda zona 31a, 31b sono disposte l'una speculare all'altra, rispetto ad un asse H parallelo all'asse z e definito dagli assi longitudinali (allineati tra loro) della porzione superiore 11a e della porzione inferiore 11b del nucleo 10. Inoltre, un primo strato antiriflesso 66 è interposto tra la porzione superiore 11a del nucleo 10 ed il primo fotodiodo 30; in particolare, il primo strato antiriflesso 66 sovrasta sia la prima che la seconda zona 31a, 31b. Tra il primo fotodiodo 30 e la seconda porzione 11b del nucleo 10 è inoltre interposto un secondo strato antiriflesso 68, il quale è sovrastato sia dalla prima che dalla seconda zona 31a, 31b. Il primo ed il secondo strato antiriflesso 66, 68 sono rispettivamente circondati dal primo e dal secondo strato di rivestimento 12, 14. A tal proposito, il primo strato di rivestimento 12 ha una dimensione, misurata lungo l'asse x, superiore alla corrispondente dimensione del secondo strato di rivestimento 14 ed ospita metallizzazioni 70 atte a consentire la polarizzazione della prima e della seconda zona 31a, 31b. Inoltre, il secondo strato di rivestimento 14 si estende in maniera tale da circondare anche la prima e la seconda zona 31a, 31b del primo fotodiodo 30, al fine di isolarle elettricamente. In modo

di per sé noto, il primo ed il secondo strato antiriflesso 66, 68 hanno spessori multipli di $\lambda/4$, al fine di compensare eventuali variazioni di indice di rifrazione del primo fotodiodo 30 rispetto al nucleo 10, dovute ad esempio al drogaggio della prima e della seconda zona 31a, 31b. Al fine di ridurre tali variazioni di indice di rifrazione, è ad esempio possibile che, come precedentemente accennato, la porzione inferiore 11b del nucleo 10 sia formata da materiale semiconduttore, quale ad esempio silicio monocristallino; in tal caso, il secondo strato antiriflesso 68 può essere formato ad esempio dallo strato di ossido sepolto di una struttura nota come "silicio su isolante" ("Silicon On Insulator", SOI). La porzione superiore 11a del nucleo 10 può inoltre essere formata da materiale semiconduttore, quale ad esempio silicio amorfo.

Come mostrato in figura 10, secondo ulteriori forme di realizzazione, il primo dispositivo optoelettronico 1 comprende un primo ed un secondo canale trasversale 72, 74, i quali hanno ad esempio la forma di parallelepipedi a base quadrata o rettangolare, tali parallelepipedi avendo basi uguali, essendo allineati tra loro ed essendo disposti, ad esempio, parallelamente all'asse x. Il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono formati da un materiale tale per cui essi formano rispettivamente, insieme alla regione superiore 4 ed al corpo semiconduttore 2, con i quali sono

a contatto diretto, una prima ed una seconda guida d'onda trasversale 83, 85.

Ad esempio, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 possono essere formati del medesimo materiale di cui è formato il nucleo 10, al fine di ottimizzare l'accoppiamento ottico tra il medesimo nucleo 10 e la prima e la seconda guida d'onda trasversale 83, 85.

In dettaglio, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 si estendono di sopra del corpo semiconduttore 2, con cui sono a contatto diretto, ed al di sotto della regione superiore 4, con cui sono a contatto diretto, sebbene siano comunque possibili forme di realizzazione in cui il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 si estendono interamente all'interno del corpo semiconduttore 2. Inoltre, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono a contatto diretto con il nucleo 10, alla cui superficie laterale S_c sono tangenti; pertanto, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono entrambi parzialmente sovrastati dal primo strato di rivestimento 12, ed inoltre sovrastano parzialmente il secondo strato di rivestimento 14. In tal modo, parte del segnale ottico può accoppiarsi sia alla prima che alla seconda guida d'onda trasversale 83, 85, previa propagazione lungo la prima o la seconda guida d'onda verticale 22, 24. In tale forma di realizzazione, il primo

fotodiodo 30 (non mostrato in figura 10) può dunque essere disposto in modo da ricevere il segnale ottico dal nucleo 10 e/o dal primo e dal secondo canale trasversale 72, 74.

In maggior dettaglio, è possibile dimostrare che, indicando con d lo spessore del primo e del secondo canale trasversale 72, 74 lungo l'asse z , la frazione di segnale ottico che muta la propria direzione di propagazione, accoppiandosi al primo ed al secondo canale trasversale 72, 74, cresce al crescere dello spessore d ed è all'incirca pari al 50% nel caso in cui $d \approx T/2$. Inoltre, in tale forma di realizzazione, è preferibile che la prima e la seconda guida d'onda verticale 22, 24, le quali in generale possono essere sia del tipo cosiddetto multimodale che del tipo cosiddetto monomodale, siano del tipo multimodale, in maniera tale per cui il periodo di propagazione T è comparabile con lo spessore d fisicamente realizzabile, quest'ultimo essendo dell'ordine di qualche micrometro.

Come mostrato in figura 11, sono inoltre possibili forme di realizzazione in cui sono presenti più di due canali trasversali (indicati genericamente con 80), i quali, a titolo puramente esemplificativo, sono disposti radialmente attorno all'asse H , angolarmente equispaziati.

Come mostrato in figura 12, secondo una possibile forma di realizzazione, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 e la porzione inferiore 11b del nucleo

10 sono formati mediante impiego di una struttura SOI in cui lo strato di ossido sepolto (indicato con 84) è sagomato al fine rimuoverne la presenza al di sopra della porzione inferiore 11b. In tal caso, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 formano un canale complessivo 82; inoltre, lo strato di ossido sepolto 84 sovrasta il secondo strato di rivestimento 14, con cui è in contatto diretto. Secondo tale forma di realizzazione, il canale complessivo 82 e la porzione inferiore 11b del nucleo 10 sono formati da un medesimo materiale, quale ad esempio silicio monocristallino; il canale complessivo 82 è delimitato lateralmente, in modo non mostrato, mediante impiego di scavi o trincee riempiti da materiale dielettrico.

Secondo un'ulteriore forma di realizzazione, mostrata in figura 13, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono almeno in parte rastremati, man mano che si allontanano dall'asse H, al fine di ottimizzare l'accoppiamento elettromagnetico tra il segnale ottico, che si propaga lungo il nucleo 10, e gli stessi primo e secondo canale trasversale 72, 74. Il primo fotodiodo 30 può dunque essere disposto alle estremità del primo e del secondo canale trasversale 72, 74. Inoltre, in luogo della regione superiore 4, può essere presente una regione di rivestimento 75, la quale definisce la superficie superiore S_1 del primo dispositivo optoelettronico 1 e definisce una

sorta di rivestimento della porzione superiore 11a del nucleo 10 e del primo e del secondo canale trasversale 72 e 74.

In dettaglio, il primo strato di rivestimento 12 è assente, pertanto la porzione superiore 11a del nucleo 10 è a contatto diretto con la regione di rivestimento 75, la quale, oltre a circondare la porzione superiore 11a del nucleo 10, sovrasta sia il primo che il secondo canale trasversale 72, 74, con i quali è in contatto diretto. A titolo puramente esemplificativo, la porzione inferiore 11b del nucleo 10 può essere leggermente rastremata verso il basso, a seconda del processo di fabbricazione adottato per formare la porzione inferiore 11b del nucleo 10.

In maggior dettaglio, la regione di rivestimento 75 è formata da un materiale avente indice di rifrazione inferiore all'indice di rifrazione del materiale che forma il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74. Ad esempio, la regione di rivestimento 75 può avere indice di rifrazione pari a n_2 , il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 avendo indici di rifrazione pari a n_1 . Ad esempio, la regione di rivestimento 75 può essere formata da uno dei materiali precedentemente citati a proposito del primo strato di rivestimento 12.

Il secondo strato di rivestimento 14 si estende almeno in parte al di sopra della superficie intermedia S_3 e

delimita inferiormente il secondo canale trasversale 74, con cui è a contatto diretto. Il secondo strato di rivestimento 14 si estende inoltre al di sotto del primo canale trasversale 72, il quale è però delimitato inferiormente da un terzo strato di rivestimento 88, il quale è interposto tra il secondo strato di rivestimento 14 ed il primo canale trasversale 72, con i quali è in contatto diretto. Il terzo strato di rivestimento 88 è formato da un materiale avente indice di rifrazione inferiore all'indice di rifrazione del materiale formante il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 ed il nucleo 10; in particolare, il terzo strato di rivestimento 88 può essere formato da un materiale scelto tra i materiali precedentemente citati a proposito del primo strato di rivestimento 12. A titolo puramente esemplificativo, la regione di rivestimento 75 ed il primo ed il terzo strato di rivestimento 14, 88 possono essere formati da un medesimo materiale. In una variante, il terzo strato di rivestimento 88 può essere assente.

Ancora in maggior dettaglio, il primo dispositivo optoelettronico 1 comprende un primo divisore di fascio ottico 90, cioè un dispositivo atto a ricevere un fascio ottico e trasmetterne una prima parte e a rifletterne una seconda parte, in direzioni differenti; il primo divisore di fascio ottico 90 è formato da un primo elemento 92 di

tipo stratiforme. Il primo elemento 92 è disposto inclinato rispetto all'asse H, il centro geometrico del primo elemento 92 giacendo lungo l'asse H. In dettaglio, il primo elemento 92 è inclinato rispetto all'asse H di un angolo compreso fra 10° ed 80° , ed in particolare fra 30° e 60° ; ad esempio, tale angolo è pari a 45° .

Il primo elemento 92 è disposto a contatto sia con la regione di rivestimento 75, sia con il terzo strato di rivestimento 88. In particolare, il primo elemento 92 è disposto all'interno del nucleo 10 in maniera tale da occludere completamente il nucleo 10 stesso, cioè ha dimensioni e disposizione tali da separare tra loro la porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b del nucleo 10, nonché il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74, i quali sono invece in contatto diretto con, rispettivamente, la porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b del nucleo 10. Il primo elemento 92 è dunque disposto in maniera tale per cui, indipendentemente dal fatto che il segnale ottico si propaghi lungo la via ottica passante 8 dall'alto verso il basso, cioè a partire dalla superficie superiore S_1 ed in direzione della superficie inferiore S_2 , o viceversa dal basso verso l'alto, il segnale ottico stesso incide sul primo elemento 92.

Il primo elemento 92 è formato, ad esempio, del medesimo materiale di cui è formato il terzo strato di

rivestimento 88, dunque è formato da un materiale differente rispetto al materiale di cui è formato il nucleo 10, ed in particolare è formato da un materiale avente indice di rifrazione inferiore rispetto all'indice di rifrazione del materiale che forma il nucleo 10 ed il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74. Ad esempio, il primo elemento 92 può essere formato da ossido di silicio; in tal caso, il nucleo 10 ed il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 possono essere formati, ad esempio, da silicio amorfo, il secondo ed il terzo strato di rivestimento 14, 88 essendo formati da ossido di silicio. Secondo tale forma di realizzazione, l'angolo critico è all'incirca pari a 23° .

In uso, in seguito all'incidere del segnale ottico sul primo elemento 92 con un angolo di incidenza superiore all'angolo critico, una prima parte del segnale ottico continua a propagarsi lungo la via ottica passante 8, dunque attraversa il primo elemento 92, mentre una seconda parte del segnale ottico viene riflessa dal primo elemento 92 e si accoppia alternativamente al primo o al secondo canale trasversale 72, 74. A titolo puramente esemplificativo, nella forma di realizzazione mostrata in figura 13, qualora il segnale ottico si propaghi nella via ottica passante 8 dall'alto verso il basso, la summenzionata seconda parte viene riflessa dal primo

elemento 92 nel primo canale trasversale 72, mentre, qualora il segnale ottico si propaghi dal basso verso l'alto, la summenzionata seconda parte viene riflessa nel secondo canale trasversale 74.

Si noti che, nonostante il segnale ottico incida sul primo elemento 92 con un angolo di incidenza superiore all'angolo critico, il primo elemento 92 consente comunque il passaggio della summenzionata prima parte del segnale ottico, grazie al fenomeno del cosiddetto tunneling ottico, tale fenomeno consistendo nell'accoppiamento del campo evanescente a valle del primo elemento 92 con il modo / i modi guidati della guida d'onda disposta a valle del primo elemento 92. Il fenomeno di tunneling ottico, e dunque l'entità della summenzionata prima parte del segnale ottico, cresce al diminuire dello spessore del primo elemento 92 ed è apprezzabile per spessori del primo elemento dell'ordine di $\lambda/10$. Ad esempio, nel caso di $\lambda=1,5\mu\text{m}$, lo spessore del primo elemento 92 può essere compreso nell'intervallo $[0,05-0,15]\mu\text{m}$. Al contrario, l'entità della summenzionata seconda parte del segnale ottico, riflessa dal primo elemento 92, diminuisce al diminuire dello spessore del primo elemento 92, a parità di angolo di incidenza. Vantaggiosamente, il primo elemento 92 può essere ottenuto tramite un processo di deposizione e può quindi avere uno spessore molto limitato (anche

inferiore a 50 nm) e ben controllato.

Al fine di ottimizzare il funzionamento della forma di realizzazione mostrata in figura 13, è possibile dimensionare il nucleo 10 in modo che la prima e la seconda guida d'onda verticale 22, 24 siano di tipo monomodale, oppure siano di tipo multimodale.

Sono comunque possibili forme di realizzazione del tipo mostrato in figura 14, in cui il primo divisore di fascio ottico 90 comprende un secondo ed un terzo elemento 94, 96, anch'essi di tipo stratiforme e formati ad esempio del medesimo materiale di cui è formato il primo elemento 92; inoltre, il primo, il secondo ed il terzo elemento 92-96 possono avere un medesimo spessore. In tale forma di realizzazione, il primo ed il secondo elemento 92, 94 sono disposti specularmente l'uno rispetto all'altro, rispetto all'asse H, e contattano entrambi il terzo elemento 96, il quale risulta lateralmente interposto tra di essi; in altre parole, il primo ed il secondo elemento 92, 94 sono disposti in modo da formare con l'asse z angoli uguali, ma con segno opposto (ad esempio, $+45^\circ$ e -45°). Inoltre, il primo ed il secondo elemento 92, 94 sono lateralmente distanziati dal primo asse H, mentre il centro geometrico del terzo elemento 96 giace lungo l'asse H, lo stesso terzo elemento 96 essendo disposto perpendicolarmente rispetto all'asse H.

Più in particolare, il primo, il secondo ed il terzo elemento 92-96 sono disposti lateralmente distanziati dal primo e dal secondo strato di rivestimento 12, 14 e dal corpo semiconduttore 2, in maniera tale per cui il primo divisore di fascio ottico 90 non occlude completamente il nucleo 10, cioè, in vista dall'alto, la forma geometrica definita dal primo divisore di fascio ottico 90 non interseca la forma geometrica (cerchio) definito dal nucleo 10, né è tangente a quest'ultimo. Il divisore di fascio ottico 90 così definito rende indipendenti le dimensioni geometriche del nucleo 10 e del primo e secondo canale trasversale 72, 74.

Operativamente, secondo la forma di realizzazione mostrata in figura 14, è possibile deviare il segnale ottico nel primo e nel secondo canale trasversale 72, 74 solo se il segnale ottico stesso si propaga dal basso verso l'alto.

Sono comunque possibili forme di realizzazione in cui il terzo elemento 96 è assente, per aumentare la frazione del segnale ottico che viene trasmessa dal primo divisore di fascio ottico 90. Sono inoltre possibili forme di realizzazione del tipo mostrato in figura 15, in cui il primo divisore di fascio ottico 90 comprende un quarto, un quinto ed un sesto elemento 98, 100, 102, i quali sono di tipo stratiforme e sono disposti in maniera tale per cui è

possibile definire un asse O, parallelo all'asse x, perpendicolare rispetto all'asse H e tale per cui il quarto, il quinto ed il sesto elemento 98, 100, 102 sono rispettivamente speculari, rispetto all'asse O, al primo, al secondo ed al terzo elemento 92-96. Pertanto, il quarto ed il quinto elemento 98, 100 sono disposti specularmente l'uno rispetto all'altro, rispetto all'asse H. Inoltre, il quarto elemento 98 è a contatto, oltre che con il sesto elemento 102, con il primo elemento 92, con cui forma un angolo ad esempio pari a 90° ; il quinto elemento 100 è disposto a contatto, oltre che con il sesto elemento 102, con il secondo elemento 94, con cui forma un angolo ad esempio pari a 90° . Il sesto elemento 102 è dunque lateralmente interposto tra il quarto ed il quinto elemento 98, 100, ed ha un rispettivo centro geometrico che giace lungo l'asse H. Anche il quarto, il quinto ed il sesto elemento 98-102 sono disposti lateralmente distanziati dal primo e dal secondo strato di rivestimento 12, 14 e dal corpo semiconduttore 2, in maniera tale per cui il primo divisore di fascio ottico 90 non occlude completamente il nucleo 10.

Operativamente, la forma di realizzazione mostrata in figura 15 consente di deviare il segnale ottico nel primo e nel secondo canale trasversale 72, 74, sia quando esso si propaga dal basso verso l'alto, sia quando esso si propaga

dall'alto verso il basso.

Sono inoltre possibili forme di realizzazione (non illustrate) analoghe alla forma di realizzazione mostrata in figura 15, ma in cui il terzo ed il sesto elemento 96, 102 del primo divisore di fascio ottico 90 sono assenti, nonché forme di realizzazione in cui, come mostrato in figura 16, il primo divisore di fascio ottico 90 è formato da una prima e da una seconda regione riflettente 104, 106. In particolare, ciascuna tra la prima e la seconda regione riflettente 104, 106 è formata da un materiale ospite, quale ad esempio una matrice polimerica, al cui interno sono distribuite particelle riflettenti, quali ad esempio particelle metalliche, le quali assolvono la funzione di diffondere il segnale ottico in direzioni differenti.

Si noti che, a titolo puramente esemplificativo, nelle forme di realizzazione mostrate nelle figure 14-16, il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono formati all'interno della regione superiore 4, anziché essere circondati dalla regione di rivestimento 75.

Come mostrato in figura 17, sono possibili forme di realizzazione in cui il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono disposti ortogonalmente tra loro, nel qual caso il primo divisore di fascio ottico 90, include il primo ed il secondo elemento 92, 94. In particolare, in figura 17 si è assunto, per semplicità di

visualizzazione, che il primo ed il secondo elemento abbiano spessore trascurabile, e che il nucleo 10 abbia sezione quadrata. In tali ipotesi, si nota come il primo ed il secondo elemento 92, 94 abbiano le forme di due triangoli rettangoli giacenti in due piani tra loro ortogonali, e le cui ipotenuse sono tra loro a contatto. Inoltre, il primo elemento 92 giace in un piano la cui normale nel punto di intersezione con l'asse del primo canale trasversale 72 forma con quest'ultimo un angolo pari a 45° ; similmente, il secondo elemento 94 giace in un piano la cui normale nel punto di intersezione con l'asse del secondo canale trasversale 74 forma con quest'ultimo un angolo pari a 45° .

Come mostrato in figura 18, sono inoltre possibili forme di realizzazione in cui il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 sono assenti. In tal caso, il primo fotodiodo 30, e dunque la prima e la seconda sacca 32, 34, sono a contatto con il nucleo 10; inoltre, il primo divisore di fascio ottico 90 è disposto in modo da riflettere parte del segnale ottico in direzione del primo fotodiodo 30. A titolo puramente esemplificativo, la forma di realizzazione mostrata in figura 18 impiega un primo divisore di fascio ottico 90 uguale al primo divisore di fascio ottico mostrato in figura 14; è tuttavia possibile impiegare uno qualsiasi dei divisori di fascio ottico

precedentemente mostrati o descritti.

Al fine di incrementare l'accoppiamento tra il primo fotodiodo 30 ed i canali trasversali, è inoltre possibile adottare le forme di realizzazione mostrate nelle figure 19a-19c e 20.

In dettaglio, come riferimento, a titolo puramente esemplificativo, al solo primo canale trasversale 72, esso definisce una porzione di contatto 110, la quale occupa un incavo 112 definito dal corpo semiconduttore 2; inoltre, la porzione di contatto 110 è a contatto diretto con il primo fotodiodo 30, ed in particolare è a contatto con la giunzione G definita dalla prima e dalla seconda sacca 32, 34. In altre parole, la porzione di contatto 110 è a contatto con la prima e la seconda sacca 32, 34, nonché, di conseguenza, con la regione di svuotamento 50.

In maggior dettaglio, l'incavo 112 è delimitato lateralmente da una prima e da una seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , sulle quali si affaccia la giunzione G.

La prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sono di tipo piano e sono disposte trasversalmente rispetto alla superficie intermedia S_3 , la quale definisce una sorta di superficie principale che delimita superiormente il corpo semiconduttore 2. Inoltre, la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sono disposte l'una speculare all'altra, rispetto ad un piano parallelo al piano yz. Pertanto, la

prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} definiscono un angolo φ compreso tra 10° ed 170° , ed in particolare compreso fra 70° e 110° ; ad esempio, l'angolo φ è pari a 90° .

In maggior dettaglio, secondo una forma di realizzazione (figura 19a), la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sovrastano entrambe la regione di svuotamento 50 e sono tra loro a contatto, in maniera tale da definire una forma a cuspidè; in particolare, la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} hanno entrambe la forma di un rettangolo, tali due rettangoli avendo due basi (o altezze) che coincidono, definendo una linea di contatto L (mostrata in figura 20), la quale giace all'interno della prima sacca 32. Inoltre, sia la prima che la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sono a contatto con la prima e la seconda sacca 32, 34; più in particolare, ciascuna tra la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} è a contatto con l'interfaccia tra la prima e la seconda sacca 32, 34 (indicata con I in figura 19a), queste ultime essendo dunque in parte delimitate lateralmente dalle stesse prima e seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} . Inoltre, come mostrato sempre in figura 19a, la porzione di contatto 110 ha uno spessore costante lungo gli assi x e y. Pertanto, oltre ad essere delimitata inferiormente dalla prima e dalla seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , la porzione di contatto 110 è

delimitata superiormente da una terza ed una quarta parete inclinata S_{i3} , S_{i4} , rispettivamente parallele alla prima ed alla seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} ; inoltre, la terza e la quarta parete inclinata S_{i3} , S_{i4} distano di una medesima distanza (pari allo spessore del primo canale trasversale 72) da, rispettivamente, la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} . Il primo canale 72 presenta inoltre un'estremità 120 delimitata da una quinta parete inclinata S_{i5} , anch'essa di tipo piano. In particolare, la quinta parete inclinata S_{i5} è lateralmente sfalsata rispetto alla prima ed alla seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} e sovrasta anch'essa la regione di svuotamento 50; inoltre la quinta parete inclinata S_{i5} sovrasta la superficie intermedia S_3 , rispetto alla quale è inclinata di un angolo ad esempio pari a 45° .

In uso, il segnale ottico si propaga lungo il primo canale trasversale 72 fino a giungere in corrispondenza della porzione di contatto 110 dove, a causa di riflessioni alla prima ed alla terza parete inclinata S_{i1} , S_{i3} , viene in parte diretto nella regione di svuotamento 50, con conseguente generazione del corrispondente segnale elettrico. Parte del segnale ottico attraversa tuttavia la porzione di contatto 110, fino a giungere all'estremità 120, dove viene riflessa dalla quinta parete inclinata S_{i5} , nuovamente in direzione della regione di svuotamento 50. In

tal modo, l'efficienza dell'accoppiamento tra il primo fotodiodo 30, di per sé di tipo planare, ed il primo canale trasversale 72 è incrementata. Inoltre, nelle porzioni di regione di svuotamento 50 disposte a contatto con la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , si verifica un incremento dell'intensità del campo elettrico, dovuto appunto all'inclinazione della prima e della seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} rispetto all'interfaccia I, le cui porzioni a contatto con la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sono sostanzialmente parallele alla superficie intermedia S_3 . Pertanto, dato un generico istante in cui il segnale ottico penetra nella regione di svuotamento 50, si riduce il ritardo del corrispondente istante in cui il primo fotodiodo 30 genera il corrispondente segnale elettrico, cioè si incrementa la cosiddetta rapidità di risposta del primo fotodiodo 30.

In una variante non mostrata, al di sopra della superficie intermedia S_3 ed in corrispondenza della prima e della seconda sacca 32 e 34 può essere presente uno strato di rivestimento, formato ad esempio del medesimo materiale del secondo strato di rivestimento 14, ed al di sopra del quale si realizza una porzione del primo canale trasversale 72.

In una ulteriore variante non mostrata, uno strato antiriflettente può essere disposto al di sopra della prima

e della seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , cioè interposto tra la seconda sacca 34 e la porzione di contatto 110, al fine migliorare l'accoppiamento del segnale ottico con il primo fotodiodo 30.

Come mostrato in figura 19b, è inoltre possibile che solo una tra la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} sia a contatto con la regione di svuotamento 50. Inoltre, come mostrato in figura 19c, la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} possono essere lateralmente distanziate tra loro, nel qual caso la porzione di contatto 110 è delimitata inferiormente, oltre che dalla prima e dalla seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , da una parete piana inferiore S_{pi} , interposta tra la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} , con cui è in contatto diretto, e parallela all'asse x. Ancora, l'estremità 120 può essere assente, nel qual caso, il primo canale trasversale 72 si estende lateralmente fino a giungere ad una parete laterale P_1 del primo dispositivo optoelettronico 1.

In una variante non mostrata, al di sopra della prima e della seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} può essere disposto uno strato, formato ad esempio di ossido di silicio ed avente la funzione di modificare la frazione di segnale ottico che viene effettivamente trasmessa al primo fotodiodo 30.

Sono inoltre possibili forme di realizzazione in cui

l'incavo 112 ha una forma tale per cui, se sezionato da due differenti piani paralleli al piano xz , esibisce una forma del tipo mostrato in figura 19a (priva di parete piana inferiore S_{pi}) ed una forma del tipo mostrato in figura 19c (con parete piana inferiore S_{pi}), al fine di massimizzare la superficie di contatto del primo canale trasversale 72 con la regione di svuotamento 50.

Come mostrato in figura 21, in cui per semplicità di visualizzazione il primo canale trasversale 72 è a contatto diretto con il corpo semiconduttore 2, sono inoltre possibili forme di realizzazione in cui più di un fotodiodo è otticamente accoppiato al primo canale trasversale 72. In particolare, il primo dispositivo optoelettronico 1 può includere un secondo fotodiodo 122, lateralmente distanziato dal primo fotodiodo 30 ed otticamente accoppiato al primo canale trasversale 72. Inoltre, come mostrato a titolo esemplificativo ancora nella figura 21, l'accoppiamento ottico tra il primo canale trasversale 72 ed il primo fotodiodo 30 può essere realizzato mediante impiego di un secondo divisore di fascio ottico 124, formato all'interno del primo canale trasversale 72 e sovrastante il primo fotodiodo 30. Nella forma di realizzazione mostrata in figura 21, anche il secondo fotodiodo 122 è otticamente accoppiato al primo canale trasversale 72 mediante impiego di un corrispondente

divisore di fascio ottico, nella fattispecie un terzo divisore di fascio ottico 126. Sia il secondo che il terzo divisore di fascio ottico 124, 126 possono essere ad esempio uguali al summenzionato primo elemento 92. Il primo ed il secondo fotodiodo 30 e 122 possono essere sia di tipo planare, sia di tipo verticale. Inoltre, sebbene non mostrato in figura 21, è possibile che il primo canale trasversale 72 si estenda lateralmente fino a giungere alla parete laterale P_1 del primo dispositivo optoelettronico 1.

Secondo una differente forma di realizzazione, mostrata in figura 22, il primo dispositivo optoelettronico 1 include un emettitore 130, quale ad esempio un laser allo stato solido. Inoltre, invece della via ottica passante, sono presenti una prima ed una seconda regione verticale 132, 134 con assi paralleli all'asse z , ma disallineate tra loro. Secondo tale forma di realizzazione la superficie superiore S_1 del primo dispositivo optoelettronico 1 è definita dalla regione di rivestimento 75.

In dettaglio, la prima e la seconda regione verticale 132, 134 si estendono rispettivamente all'interno della regione di rivestimento 75 e del corpo semiconduttore 2, rispettivamente a partire dalla superficie superiore S_1 e dalla superficie intermedia S_3 , la seconda regione verticale 134 essendo rivestita dal secondo strato di rivestimento 14. La prima e la seconda regione verticale

132, 134 sono tra loro raccordate da una prima porzione 141a del primo canale trasversale (qui indicato con 140), a cui lo stesso emettitore 130 è otticamente accoppiato.

Più in particolare, l'emettitore 130 e la prima e la seconda regione verticale 132, 134 sono lateralmente distanziati tra loro, la prima regione verticale 132 essendo interposta tra la seconda regione verticale 134 e l'emettitore 130. L'emettitore 130 è otticamente accoppiato alla prima regione verticale 132 mediante una seconda porzione 141b del primo canale trasversale 140, la quale è separata dalla prima porzione 141a dal primo elemento 92. In tal modo, sia la prima che la seconda regione verticale 132, 134 sono otticamente accoppiate all'emettitore 130, attraverso il primo canale trasversale 140.

In maggior dettaglio, la seconda regione verticale 134 è otticamente accoppiata al primo canale trasversale 140, cioè il segnale ottico può propagarsi, in successione, nella seconda regione verticale 134 e poi nel primo canale trasversale 140, grazie ad una prima superficie riflettente S_m , definita dalla regione di rivestimento 75 e disposta ad una prima estremità della prima porzione 141a del primo canale trasversale 140, in modo da sovrastare la seconda regione verticale 134. La prima superficie riflettente S_m , è di tipo piano ed è inclinata, ad esempio, di 45° rispetto all'asse z , cioè rispetto all'asse della seconda regione

verticale 134.

A sua volta, il primo canale trasversale 140 è otticamente accoppiato alla prima regione verticale 132 grazie al primo elemento 92. In particolare, il primo elemento 92 è inclinato di 45° rispetto all'asse della prima regione verticale 132, dalla quale è sovrastato; inoltre, la prima superficie riflettente S_m ed il primo elemento riflettente 92 sono disposti a 90° . Il primo elemento 92 accoppia dunque otticamente la prima regione verticale 132 e l'emettitore 130, il quale può, in modo di per sé noto, includere al suo interno anche un modulatore ottico.

Secondo una variante non mostrata, la prima superficie riflettente S_m è definita, anziché dalla regione di rivestimento 75, da uno strato di materiale metallico, quale ad esempio un film di alluminio, oppure da uno strato formato da un materiale ospite polimerico, al cui interno sono disperse particelle metalliche.

Secondo una forma di realizzazione illustrata in figura 23, il primo canale trasversale 72 è otticamente accoppiato in modo bidirezionale alla porzione superiore 11a ed alla porzione inferiore 11b del nucleo 10 mediante impiego di una struttura di accoppiamento 142 analoga al divisore di fascio ottico mostrato in figura 14, ma in cui è presente, al posto del primo elemento 92, la prima

superficie riflettente S_m , definita dalla regione di rivestimento 75 e disposta specularmente al secondo elemento 94, rispetto all'asse del nucleo 10. La struttura di accoppiamento 142 così formata è sovrastata dalla porzione superiore 11a del nucleo 10 e sovrasta la porzione inferiore 11b del nucleo 10.

In particolare, la prima superficie riflettente S_m è formata da una sporgenza 144 della regione di rivestimento 75, la quale si estende lateralmente all'interno del nucleo 10. La sporgenza 144 è delimitata lateralmente dalla prima superficie riflettente S_m ; inoltre, la sporgenza 144 è delimitata inferiormente da una superficie di base S_b , la quale si diparte a 90° dalla superficie laterale S_c del nucleo 10. Sia la prima superficie riflettente S_m che la superficie di base S_b sono di tipo piano, in maniera tale per cui la sporgenza 144 ha la forma di un prisma a base di triangolo rettangolo, con asse parallelo all'asse y .

Come mostrato in figura 24, la sporgenza 144 può essere formata, oltre che alla prima superficie riflettente S_m , da una seconda superficie riflettente S_{mb} ; in tal caso, il secondo ed il terzo elemento 94, 96 sono assenti.

In dettaglio, la seconda superficie riflettente S_{mb} si diparte anch'essa dalla superficie laterale S_c del nucleo 10 e forma con la prima superficie riflettente S_m un angolo ad esempio pari a 90° . In particolare, la prima e la

seconda superficie riflettente S_m , S_{mb} sono disposte in maniera tale per cui la sporgenza 144 ha la forma di un prisma a base di triangolo isoscele, la cui altezza relativa al lato differente dalle summenzionate prima e seconda superficie riflettente S_m , S_{mb} è parallela all'asse x ; più in particolare, tale altezza giace sostanzialmente lungo l'asse longitudinale del primo canale trasversale 72 (indicato con OH).

Si noti che, ai fini pratici, la sporgenza 144 funge da divisore di fascio ottico nei confronti del segnale ottico, nel caso in cui quest'ultimo si propaghi all'interno del nucleo 10 a partire dalla superficie superiore S_1 o dalla superficie inferiore S_2 in direzione della sporgenza 144 stessa, oppure nel caso in cui il segnale ottico si propaghi all'interno del primo canale trasversale 72 a partire dalla parete laterale P_1 .

Come mostrato in figura 25, il primo dispositivo optoelettronico 1 può essere accoppiato ad un secondo dispositivo optoelettronico 150, al fine di formare un sistema optoelettronico 155.

Il primo dispositivo 1 comprende in tal caso un primo ricevitore ottico 160 ed un primo trasmettitore ottico 162, laddove per ricevitore ottico si intende un fotorivelatore ed un rispettivo circuito elettrico di controllo, mentre per trasmettitore ottico si intende una sorgente luminosa

(ad esempio un laser) ed un rispettivo circuito elettrico di pilotaggio, eventualmente provvisto di funzioni di modulatore. Inoltre, il primo dispositivo optoelettronico 1 comprende una prima ed una seconda via ottica di accoppiamento 164, 166, ciascuna delle quali è alternativamente formata da una via ottica passante, oppure da una corrispondente coppia di vie cieche. Il primo ricevitore ottico 160 ed il primo trasmettitore ottico 162 sono rispettivamente accoppiati otticamente alla prima ed alla seconda via ottica di accoppiamento 164, 166.

Il secondo dispositivo optoelettronico 150 comprende un secondo ricevitore ottico 168 ed un secondo trasmettitore ottico 170, nonché una terza ed una quarta via ottica di accoppiamento 172, 174. Il secondo ricevitore ottico 168 ed il secondo trasmettitore ottico 170 sono rispettivamente accoppiati alla terza ed alla quarta via ottica di accoppiamento 172, 174.

Il primo ed il secondo dispositivo optoelettronico 1, 150 sono disposti l'uno sopra l'altro, in maniera tale per cui la prima e la terza via ottica di accoppiamento 164, 172 sono allineate ed a contatto tra loro, e la seconda e la quarta via ottica di accoppiamento 166, 174 sono allineate ed a contatto tra loro. In tal modo, i segnali ottici generati dal primo trasmettitore ottico 162 sono ricevuti dal secondo ricevitore ottico 168, previa

propagazione lungo la seconda e la quarta via ottica di accoppiamento 166, 174. Similmente, i segnali ottici generati dal secondo trasmettitore ottico 170 sono ricevuti dal primo ricevitore ottico 160, previa propagazione lungo la prima e la terza via ottica di accoppiamento 164, 172. E' dunque stabilita una comunicazione di tipo bidirezionale tra il primo ed il secondo dispositivo optoelettronico 1, 150.

Sono peraltro possibili forme di realizzazione in cui il primo ricevitore ottico 160 ed il primo trasmettitore ottico 162 sono entrambi accoppiati otticamente alla prima via ottica di accoppiamento 164, ed il secondo ricevitore ottico 168 ed il secondo trasmettitore ottico 170 sono entrambi accoppiati otticamente alla terza via ottica di accoppiamento 172. In tal caso, la seconda e la quarta via ottica di accoppiamento 166, 174 sono assenti. Inoltre, tra il primo ed il secondo dispositivo optoelettronico 1, 150 può essere interposta una guida d'onda esterna, diretta orizzontalmente, nel qual caso la prima e la terza via ottica di accoppiamento 164, 172 possono non essere allineate tra loro.

Nel caso in cui il primo ricevitore ottico 160 ed il primo trasmettitore ottico 162 siano entrambi accoppiati otticamente alla prima via ottica di accoppiamento 164, essi sono accoppiati rispettivamente al primo ed il secondo

canale trasversale, i quali sono orientati in modo da formare un angolo ad esempio pari a 90° , in maniera tale per cui la radiazione elettromagnetica prodotta dal primo trasmettitore ottico 162 si accoppia alla prima via di accoppiamento 164 senza essere ricevuta dal primo ricevitore ottico 160.

In una forma di realizzazione non mostrata, accanto al primo ed al secondo dispositivo optoelettronico 1, 150 possono essere presenti un terzo ed un quarto dispositivo optoelettronico, i quali si accoppiano otticamente in direzione orizzontale tramite rispettivi canali trasversali, i quali si estendono lateralmente fino a giungere alle rispettive pareti laterali.

Nel seguito si descrivono metodi di fabbricazione di alcune delle forme realizzative precedentemente descritte, a titolo puramente esemplificativo.

Ad esempio, per fabbricare la forma di realizzazione mostrata in figura 2, si eseguono le operazioni mostrate nelle figure 26a-26h.

In dettaglio (figura 26a), si predispongono il corpo semiconduttore 2, al cui interno è formato il primo fotodiodo 30, e la regione superiore 4.

Successivamente (figura 26b), si effettua un primo processo di fotolitografia, mediante applicazione di una prima maschera di resist 200 alla superficie superiore S_1 ,

e successivo attacco anisotropo della regione superiore 4, al fine di formare una prima trincea 202, la quale si estende a partire dalla superficie superiore S_1 , fino alla superficie intermedia S_3 , ed ha la forma, in vista dall'alto, di una corona circolare.

In seguito (figura 26c), si rimuove la prima maschera di resist 200 e si effettua un primo processo di deposizione chimica da fase vapore ("chemical vapor deposition", CVD), al fine di formare il primo strato di rivestimento 12, all'interno della prima trincea 202.

Successivamente (figura 26d), si capovolge il primo dispositivo optoelettronico 1 e si effettua un processo di abrasione posteriore ("back-grinding") del corpo semiconduttore 2, al fine di ridurre lo spessore di quest'ultimo in un intervallo compreso, ad esempio, tra $50\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$.

In seguito (figura 26e), si effettua un secondo processo di fotolitografia, mediante applicazione di una seconda maschera di resist 204 alla superficie inferiore S_2 , e successivo attacco anisotropo del corpo semiconduttore 2, al fine di formare una seconda trincea 206, avente la medesima forma, in vista dall'alto, della prima trincea 202, alla quale è verticalmente allineata. La seconda trincea 206 si estende a partire dalla superficie inferiore S_2 , fino a giungere ad una distanza pari allo

spessore h dalla superficie intermedia S_3 . In particolare, l'attacco anisotropo può essere effettuato mediante il cosiddetto processo di attacco profondo a reazione ionica ("Deep Reactive Ion Etching", DRIE).

Successivamente (figura 26f), si rimuove la seconda maschera di resist 204 e si effettua un secondo processo di deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare il secondo strato di rivestimento 14, all'interno della seconda trincea 206. Alternativamente, è possibile effettuare un processo di ossidazione termica.

In seguito (figura 26g), si effettua un terzo processo di fotolitografia, mediante applicazione di una terza maschera di resist 208 alla superficie inferiore S_2 , e successivo attacco anisotropo del corpo semiconduttore 2 e della regione superiore 4, al fine di formare un primo foro 210 avente ad esempio forma cilindrica, estendentesi tra la superficie inferiore S_2 e la superficie superiore S_1 , e circondata direttamente dal primo e dal secondo strato di rivestimento 12, 14. Il primo foro 210 è dunque passante e l'attacco anisotropo che ne conduce alla formazione può ad esempio essere un attacco DRIE. E' inoltre possibile che tale attacco anisotropo sia effettuato applicando la terza maschera di resist 208 alla superficie superiore S_1 , anziché alla superficie inferiore S_2 . Alternativamente, il primo foro 210 può essere formato mediante un processo di

foratura laser ("laser drilling"), il quale non necessita di maschere.

Successivamente (figura 26h), si rimuove la terza maschera di resist 208 e si effettua un terzo processo di deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare il nucleo 10, all'interno del primo foro 210. Alternativamente, è possibile riempire il primo foro 210 con un polimero, mediante un processo di spinnatura ("spinning"), e successivamente effettuare un indurimento ("curing") del polimero.

Al fine di fabbricare una forma di realizzazione del tipo mostrato in figura 13, ma in cui il primo ed il secondo canale trasversale 72, 74 non sono rastremati, è possibile effettuare le operazioni mostrate nelle figure 27a-27l.

Come mostrato in figura 27a, si predispone il corpo semiconduttore 2, al cui interno è formato il primo fotodiodo 30 (non mostrato nelle figure 27a-27h). Inoltre, si esegue un primo attacco anisotropo del corpo semiconduttore 2, a partire dalla superficie intermedia S_3 , al fine di formare il primo foro, qui indicato con 220 ed estendentesi all'interno del corpo semiconduttore 2; il primo foro 220 è di tipo cieco. A tal fine, è possibile effettuare un attacco DRIE.

In seguito (figura 27b), si effettua una prima

deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare un primo strato preliminare 14bis, il quale ricopre la superficie intermedia S_3 e riveste le pareti laterali ed il fondo del primo foro 220, senza riempirlo completamente; alternativamente, si esegue un processo di ossidazione termica.

Successivamente (figura 27c), si effettua una seconda deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare una prima regione di processo 72bis al di sopra del primo strato preliminare 14bis, la quale sovrasta dunque l'intera superficie intermedia S_3 e riempie completamente il primo foro 220, dove è circondata dal primo strato preliminare 14bis.

In seguito (figura 27d), si esegue un secondo attacco anisotropo, al fine di rimuovere selettivamente una porzione della prima regione di processo 72bis, la porzione rimanente della seconda regione di processo 72bis definendo il primo canale trasversale 72, nonché la porzione inferiore 11b del nucleo 10. Tale attacco anisotropo causa inoltre la formazione di una prima superficie di processo S_{p1} , inclinata sia rispetto all'asse della porzione inferiore 11 del nucleo 10, sia rispetto all'asse del primo canale trasversale 72, cioè inclinata (ad esempio, di 45°) rispetto agli assi z e x . La prima superficie di processo S_{p1} è di tipo piano, ha forma rettangolare ed è definita

dallo stesso primo canale trasversale 72; inoltre, la prima superficie di processo S_{p1} è sovrapposta alla porzione inferiore 11b del nucleo 10.

Successivamente (figura 27e), si esegue una terza deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare un secondo strato preliminare 88bis, il quale si estende al di sopra del primo canale trasversale 72 e di parte del primo strato preliminare 14bis. Pertanto, il secondo strato preliminare 88bis si estende anche al di sopra della prima superficie di processo S_{p1} , con cui è a contatto diretto.

In seguito (figura 27f), si esegue una quarta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare una seconda regione di processo 73, disposta al di sopra del secondo strato preliminare 88bis e destinata a formare il secondo canale trasversale 74.

Successivamente (figura 27g), si esegue una prima levigatura chimico meccanica ("Chemical Mechanical Polishing", CMP), al fine di rimuovere una porzione superiore della seconda regione di processo 73, fino a esporre nuovamente il primo canale trasversale 72. La porzione di seconda regione di processo 73 rimasta dopo tale prima levigatura chimico meccanica forma il secondo canale trasversale 74. Durante tale levigatura, viene inoltre rimossa una porzione del secondo strato preliminare 88bis, la porzione rimanente del secondo strato preliminare

88bis definendo il terzo strato di rivestimento 88 ed il summenzionato primo elemento 92, cioè il primo divisore di fascio ottico.

In seguito (figura 27h), si esegue una quinta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare la regione di rivestimento 75, al di sopra del primo e del secondo canale trasversale 72, 74.

Successivamente (figura 27i), si esegue un terzo attacco anisotropo, al fine di formare un secondo foro 230. Il secondo foro 230 è di tipo cieco ed è delimitato inferiormente dal secondo canale trasversale 74; inoltre, il secondo foro 230 è verticalmente allineato alla porzione inferiore 11b del nucleo 10 e sovrasta il primo elemento 92.

In seguito (figura 27l), si esegue una sesta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare, all'interno del secondo foro 230, la porzione superiore 11a del nucleo 10. Infine, si esegue una levigatura meccanica chimica della porzione inferiore del corpo semiconduttore 2 (fase non mostrata), fino ad esporre la porzione inferiore 11b del nucleo, rimuovendo una corrispondente porzione del primo strato preliminare 14bis; la porzione rimanente del primo strato preliminare 14bis definisce così il secondo strato di rivestimento 14.

Relativamente alla forma di realizzazione mostrata in

figura 22, ed assumendo per semplicità di descrizione che l'emettitore 130 sia assente, è invece possibile eseguire le operazioni illustrate nelle figure 27a-27d, in cui la summenzionata prima superficie di processo S_{p1} funge da prima superficie riflettente S_m . Successivamente, si eseguono le operazioni illustrate nelle figure 28a-28h.

In dettaglio (figura 28a), si effettua una terza deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare, al di sopra della prima regione di processo 72bis, la seconda regione di processo 73, la quale sovrasta anche il primo strato preliminare 14bis, con cui è in parte a contatto diretto.

Successivamente (figura 28b), si esegue una prima levigatura chimico meccanica, al fine di rimuovere una porzione superiore della seconda regione di processo 73, fino ad esporre nuovamente parte della prima regione di processo 72bis.

In seguito (figura 28c), si esegue un terzo attacco anisotropo, al fine di rimuovere selettivamente una parte della prima regione di processo 72bis, disposta lateralmente ed a distanza dalla prima superficie riflettente S_m ; in particolare, la rimozione è tale da esporre una corrispondente porzione del primo strato preliminare 14bis. La porzione rimanente della prima regione di processo 72bis definisce la prima porzione 141a

del primo canale trasversale 140, oltre che la seconda regione verticale 134.

In particolare, la prima porzione 141a è delimitata lateralmente da una seconda superficie di processo S_{p2} , la quale è di tipo planare, ha forma rettangolare ed è lateralmente distanziata rispetto alla prima superficie riflettente S_m . Più in particolare, la seconda superficie di processo S_{p2} è inclinata rispetto all'asse z , rispetto all'asse del primo canale trasversale 140 (parallelo all'asse x) e rispetto alla prima superficie riflettente S_m . Ad esempio, la seconda superficie di processo S_{p2} è inclinata di 45° rispetto agli assi x e z , e di 90° rispetto alla prima superficie riflettente S_m .

Successivamente (figura 28d), si effettua una quarta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare il secondo strato preliminare 88bis, al di sopra della prima regione di processo 73, della prima porzione 141a del primo canale trasversale 140 e della porzione esposta del primo strato preliminare 14bis.

In seguito (figura 28e), si effettua una quinta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare una terza regione di processo 141b-bis, al di sopra del secondo strato preliminare 88bis.

Successivamente (figura 28f), si effettua una seconda levigatura chimico meccanica della terza regione di

processo 141b-bis, fino ad esporre nuovamente la prima porzione 141a del primo canale trasversale 140. In pratica, durante tale seconda levigatura, vengono rimosse una parte della terza regione di processo 141b-bis ed una parte del secondo strato preliminare 88bis, quest'ultima parte essendo precedentemente disposta al di sopra della seconda regione di processo 73 e della prima porzione 141a del primo canale trasversale 140. La porzione rimanente della terza regione di processo 141b-bis definisce la seconda porzione 141b del primo canale trasversale 140. Una prima porzione rimanente del secondo strato preliminare 88bis, disposta al di sopra della seconda superficie di processo S_{p2} , definisce invece il summenzionato primo elemento 92, cioè fungerà, in uso, da divisore di fascio ottico; una seconda porzione rimanente del secondo strato preliminare 88bis, disposta a contatto con il primo strato preliminare 14bis, forma il terzo strato di rivestimento 88.

In seguito (figura 28g), viene effettuata una sesta deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare una quarta regione di processo 79, la quale forma, insieme alla seconda regione di processo 73, la regione di rivestimento 75.

Successivamente (figura 28h), si effettua un quarto attacco anisotropo, al fine di formare il secondo foro, qui indicato con 250. Il secondo foro 250 è di tipo cieco, è

verticalmente allineato al primo elemento 92 ed è delimitato inferiormente dalla seconda porzione 141b del primo canale trasversale 140. Si esegue quindi una settima deposizione chimica da fase vapore, al fine di formare, all'interno del secondo foro 250, la prima regione verticale 132. Infine (fase non mostrata), si esegue una levigatura meccanico chimica della superficie inferiore, fino ad esporre la seconda regione verticale 134.

I vantaggi che il presente dispositivo optoelettronico consente di ottenere emergono chiaramente dalla precedente descrizione. In particolare, il presente dispositivo optoelettronico consente di realizzare sistemi tridimensionali ("tridimensional", 3D), in cui due o più dispositivi optoelettronici integrati sono disposti l'uno sopra l'altro e sono in grado di comunicare tra loro per via ottica. Inoltre, adottando una delle forme di realizzazione con almeno un canale trasversale che si estende fino alla parete laterale del dispositivo optoelettronico, è possibile formare un sistema comprendente due o più dispositivi optoelettronici tra loro affiancati e con i rispettivi canali trasversali allineati, al fine di consentire la comunicazione tra i medesimi.

In aggiunta, dal momento che il primo fotodiodo 30 e/o l'emettitore 130 sono formati nel corpo semiconduttore 2, essi sono appunto formati del medesimo semiconduttore di

cui è formato il corpo semiconduttore 2, senza la necessità di prevedere fasi di incollaggio al corpo semiconduttore 2 di un ulteriore corpo formato da un differente materiale semiconduttore. Ancora, il presente dispositivo optoelettronico è di tipo integrato, dunque può essere fabbricato mediante impiego di sole tecnologie di tipo microelettronico, e dunque senza necessità di ricorrere ad operazioni quali, ad esempio, l'incollaggio.

Risulta infine chiaro che rispetto a quanto qui descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

Ad esempio, il primo fotodiodo 30 può essere del tipo cosiddetto PIN, anziché PN; inoltre, invece del primo fotodiodo 30, può essere presente un emettitore ottico, quale ad esempio un LED o un LASER. In generale, inoltre, ci si riferisce ad un componente optoelettronico integrato nel corpo semiconduttore 2 per indicare un qualsiasi componente optoelettronico la cui regione attiva è formata nel corpo semiconduttore 2; tale regione attiva può ad esempio includere, in modo di per sé noto, una giunzione PN, oppure, nel caso di un emettitore ottico, la regione in cui avviene il fenomeno dell'emissione stimolata o dell'emissione spontanea. Inoltre, il componente

optoelettronico integrato nel corpo semiconduttore può essere, ad esempio, un fotoconduttore, un fotoresistore o un fototransistore.

Il primo ed il secondo strato di rivestimento 12, 14 possono essere formati da materiali tra loro differenti.

Relativamente ai canali trasversali, sono possibili forme di realizzazione in cui è presente solo il primo canale trasversale 72. Inoltre, le forme geometriche descritte relativamente al primo ed al secondo canale trasversale 72, 74, nonché a proposito del nucleo 10 sono puramente esemplificative. Ad esempio, è possibile che una o entrambe tra la porzione superiore 11a e la porzione inferiore 11b del nucleo 10 abbiano la forma di un tronco di cono o di un tronco di piramide. Inoltre, uno o entrambi tra il primo ed il secondo canale trasversale possono avere forme differenti, quali ad esempio una forma a striscia, oppure una forma cosiddetta di guida d'onda a nervatura ("rib waveguide").

Analogamente, anche le forme della prima e della seconda regione verticale 132, 134 possono essere differenti rispetto a quanto descritto.

In aggiunta, anche la prima e la seconda parete inclinata S_{i1} , S_{i2} possono avere forme differenti rispetto a quanto descritto ed illustrato; ad esempio, esse possono avere forma trapezoidale.

Infine, sono possibili forme di realizzazione ibride rispetto alle forme di realizzazione descritte e/o illustrate, in cui sono presenti caratteristiche tecniche di due o più tra le forme di realizzazione descritte e/o illustrate.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo optoelettronico integrato, delimitato da una prima superficie (S_1) e da una seconda superficie (S_2) e comprendente:

- un corpo (2) di materiale semiconduttore, al cui interno è formato almeno un componente optoelettronico a scelta tra un rivelatore (30) ed un emettitore (130); e

- un cammino ottico (OP), il quale è almeno in parte di tipo guidato e si estende tra la prima superficie e la seconda superficie, detto cammino ottico attraversando il corpo;

in cui il componente optoelettronico è otticamente accoppiato, attraverso il cammino ottico, ad una prima ed una seconda porzione di spazio libero disposte rispettivamente al di sopra ed al di sotto della prima e della seconda superficie.

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, comprendente inoltre una regione superiore (4;75), disposta al di sopra del corpo (2) e definente la prima superficie (S_1), il corpo essendo delimitato dalla seconda superficie (S_2) e da una superficie principale (S_3), la superficie principale essendo interposta tra la prima e la seconda superficie; ed in cui il cammino ottico (OP) è definito da una prima ed una seconda regione di confinamento (11a,11b;132,134), la prima regione di confinamento

estendendosi all'interno della regione superiore, a partire dalla prima superficie, la seconda regione di confinamento estendendosi all'interno del corpo, a partire dalla seconda superficie; ed in cui la prima regione di confinamento è circondata lateralmente da una prima regione laterale (12;75), la quale ha un indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione (n_1) della prima regione di confinamento, in maniera tale per cui la prima regione di confinamento e la prima regione laterale formano una prima guida d'onda di accoppiamento (22); ed in cui la seconda regione di confinamento è circondata lateralmente da una seconda regione laterale (14), la quale ha un indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione (n_1) della seconda regione di confinamento, in maniera tale per cui la seconda regione di confinamento e la seconda regione laterale formano una seconda guida d'onda di accoppiamento (24).

3. Dispositivo secondo la rivendicazione 2, comprendente inoltre un primo strato di rivestimento (12), il quale circonda lateralmente la prima regione di confinamento (11a;132) e forma la prima regione laterale.

4. Dispositivo secondo la rivendicazione 2 o 3, comprendente inoltre un secondo strato di rivestimento (14), il quale circonda lateralmente la seconda regione di confinamento (11b;134) e forma la seconda regione laterale.

5. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 4, comprendente un foro (8) estendentesi tra la prima superficie (S_1) e la seconda superficie (S_2), la prima e la seconda regione di confinamento (11a;11b) essendo disposte all'interno del foro.

6. Dispositivo secondo la rivendicazione 5, comprendente un nucleo (10), il quale è disposto all'interno del foro (8) e forma la prima e la seconda regione di confinamento (11a,11b).

7. Dispositivo secondo la rivendicazione 6, in cui la prima e la seconda regione di confinamento (11a,11b) sono disposte l'una sopra l'altra; ed in cui la prima e la seconda regione laterale (12,14) sono disposte l'una sopra l'altra e sono tra loro separate, in maniera tale per cui il nucleo comprende una regione non rivestita (11c), interposta tra la prima e la seconda regione di confinamento; ed in cui il componente optoelettronico (30;130) è otticamente accoppiato a detta regione non rivestita.

8. Dispositivo secondo la rivendicazione 7, in cui il componente optoelettronico (30;130) è formato da una prima ed una seconda regione (32,34) di materiale semiconduttore, aventi tipi di conducibilità differenti e separate da una superficie di interfaccia (I), la quale è a diretto

contatto con la regione non rivestita (11c) del nucleo (10).

9. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 4, in cui la prima e la seconda regione di confinamento (11a,11b) sono disposte l'una sopra l'altra; ed in cui il componente elettronico è interposto tra la prima e la seconda regione di confinamento (11a,11b).

10. Dispositivo secondo la rivendicazione 6, comprendente inoltre un primo canale trasversale (72;80;140), il quale si estende trasversalmente rispetto al nucleo (10), con cui è a contatto diretto, ed è circondato superiormente ed inferiormente da una terza regione laterale (2,4;75), la quale ha un indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione (n_1) del primo canale trasversale, in maniera tale per cui il primo canale trasversale e la terza regione laterale formano una prima guida d'onda trasversale (83), detta prima guida d'onda trasversale essendo otticamente accoppiata alla prima ed alla seconda guida d'onda di accoppiamento (22, 24).

11. Dispositivo secondo la rivendicazione 10, comprendente inoltre un divisore di fascio ottico (90) atto ad accoppiare otticamente la prima guida d'onda trasversale (83) alla prima ed alla seconda guida d'onda di

accoppiamento (22,24).

12. Dispositivo secondo la rivendicazione 11, in cui la prima e la seconda guida d'onda di accoppiamento (22,24) si estendono parallelamente ad una prima direzione (z), ed in cui la prima guida d'onda trasversale (83) si estende parallelamente ad una seconda direzione (x); ed in cui il divisore di fascio ottico (90) comprende un primo elemento stratiforme (92), il quale è disposto all'interno del foro (8), trasversalmente rispetto alla prima ed alla seconda direzione, ed ha indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione del nucleo (n_1).

13. Dispositivo secondo la rivendicazione 12, comprendente inoltre un secondo canale trasversale (74), il quale si estende trasversalmente rispetto al nucleo (10) ed è circondato superiormente ed inferiormente da una quarta regione laterale (2,4;75), l'indice di rifrazione (n_2) del secondo canale trasversale essendo superiore all'indice di rifrazione (n_1) della quarta regione laterale, in maniera tale per cui il secondo canale trasversale e la quarta regione laterale formano una seconda guida d'onda trasversale (85).

14. Dispositivo secondo la rivendicazione 13, in cui il primo elemento stratiforme (92) separa la prima regione di confinamento (11a) dalla seconda regione di confinamento (11b), ed il primo canale trasversale (72) dal secondo

canale trasversale (74), detto primo elemento stratiforme essendo inoltre configurato in maniera tale da accoppiare un segnale ottico alternativamente alla prima guida d'onda trasversale, se il segnale ottico si propaga nella prima guida d'onda di accoppiamento (22) a partire dalla prima superficie (S_1), oppure alla seconda guida d'onda trasversale, se il segnale ottico si propaga nella seconda guida d'onda di accoppiamento (24) a partire dalla seconda superficie (S_2).

15. Dispositivo secondo la rivendicazione 13, in cui la seconda guida d'onda trasversale (85) si estende parallelamente alla seconda direzione (x), ed in cui il divisore di fascio ottico (90) comprende un secondo elemento stratiforme (94), disposto speculare al primo elemento (92), rispetto ad un asse parallelo alla prima direzione (z).

16. Dispositivo secondo la rivendicazione 15, in cui il divisore di fascio ottico (90) comprende inoltre un terzo ed un quarto elemento stratiforme (98,100), i quali sono disposti rispettivamente speculari al primo ed al secondo elemento stratiforme (92,94), rispetto ad un asse parallelo alla seconda direzione (x), il divisore di fascio ottico (90) essendo atto ad accoppiare un segnale ottico sia alla prima che alla seconda guida d'onda trasversale (83,85), se il segnale ottico si propaga nella prima guida

d'onda di accoppiamento (22) a partire dalla prima superficie (S_1), oppure si propaga nella seconda guida d'onda di accoppiamento (24) a partire dalla seconda superficie (S_2).

17. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 12 a 16, in cui la prima e la seconda direzione (z, x) sono tra loro ortogonali e detto primo elemento stratiforme (92) forma un angolo sostanzialmente pari a 45° sia con la prima che con la seconda direzione.

18. Dispositivo secondo la rivendicazione 10, comprendente inoltre una struttura di accoppiamento (142) atta ad accoppiare un segnale ottico propagantesi lungo la prima guida d'onda trasversale (83) ed in direzione del nucleo (10) con la prima e la seconda guida d'onda di accoppiamento (22,24), detta struttura di accoppiamento comprendendo almeno una superficie riflettente (S_m).

19. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 10-18, in cui il primo canale trasversale (72;80;140) si estende al di sopra della superficie principale (S_3) del corpo (2) ed al di sotto di detta prima superficie (S_1).

20. Dispositivo secondo la rivendicazione 19, in cui il corpo (2) forma un incavo (112), il quale si estende a partire dalla superficie principale (S_3) ed è delimitato almeno da una prima parete (S_{p1}), disposta trasversalmente

rispetto alla superficie principale; ed in cui il primo canale trasversale (72) si estende almeno in parte all'interno dell'incavo; ed in cui il componente optoelettronico (30;130) è formato da una prima e da una seconda regione (32,34) che formano una giunzione, detta giunzione affacciandosi sulla prima parete.

21. Dispositivo secondo la rivendicazione 20, in cui l'incavo (112) è inoltre delimitato da una seconda parete (S_{i2}), la quale è trasversale rispetto alla superficie principale (S_3) ed alla prima parete (S_{i1}), detta giunzione (32,34) affacciandosi inoltre sulla seconda parete.

22. Dispositivo secondo la rivendicazione 20 o 21, in cui una porzione del primo canale trasversale (72) disposta al di sopra della prima parete (S_{i1}) è delimitata superiormente da una ulteriore parete (S_{i3}), la quale è parallela alla prima parete.

23. Sistema optoelettronico comprendente almeno un primo dispositivo optoelettronico (1,150) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, detto primo dispositivo optoelettronico comprendendo un emettitore ottico (162); detto sistema optoelettronico comprendendo inoltre un secondo dispositivo optoelettronico (150), il quale comprende un rivelatore ottico (168), detto emettitore ottico e detto rivelatore ottico essendo otticamente accoppiati attraverso il cammino ottico (OP)

del primo dispositivo optoelettronico.

24. Metodo di fabbricazione di un dispositivo optoelettronico delimitato da una prima superficie (S_1) e da una seconda superficie (S_2), comprendente le fasi di:

- formare un corpo (2) di materiale semiconduttore, al cui interno è formato almeno un componente optoelettronico a scelta tra un rivelatore (30) ed un emettitore (130); e

- formare un cammino ottico (OP), il quale è almeno in parte di tipo guidato e si estende tra la prima superficie e la seconda superficie, detto cammino ottico attraversando il corpo;

ed in cui detta fase di formare un cammino ottico comprende formare il cammino ottico in maniera tale per cui il componente optoelettronico è otticamente accoppiato, attraverso detto cammino ottico, ad una prima ed una seconda porzione di spazio libero disposte rispettivamente al di sopra ed al di sotto della prima e della seconda superficie.

25. Metodo di fabbricazione secondo la rivendicazione 24, in cui il corpo (2) è delimitato dalla seconda superficie (S_2) e da una superficie principale (S_3), e comprendente inoltre la fase di formare al di sopra del corpo (2) una regione superiore (4;75) definente la prima superficie (S_1), in maniera tale per cui la superficie principale è interposta tra la prima e la seconda

superficie; ed in cui la fase di formare il cammino ottico (OP) comprende:

- formare, a partire dalla prima superficie (S_1), una prima regione di confinamento (11a;132), estendentesi all'interno della regione superiore;

- formare, a partire dalla seconda superficie (S_2), una seconda regione di confinamento (11b;134), estendentesi all'interno del corpo;

- formare, attorno alla prima regione di confinamento, una prima regione laterale (12;75), la quale ha un indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione (n_1) della prima regione di confinamento; e

- formare, attorno alla seconda regione di confinamento, una seconda regione laterale (14), la quale ha un indice di rifrazione (n_2) inferiore all'indice di rifrazione (n_1) della seconda regione di confinamento.

26. Metodo secondo la rivendicazione 25, in cui dette fasi di formare una prima ed una seconda regione di confinamento (11a; 132; 11b, 134) ed una prima ed una seconda regione laterale (12,14;75) comprendono:

- formare una prima trincea (202) all'interno della regione superiore;

- formare la prima regione laterale, all'interno della prima trincea;

- formare una seconda trincea (206), all'interno del

corpo (2);

- formare la seconda regione laterale, all'interno della seconda trincea;

- rimuovere selettivamente porzioni della regione superiore e del corpo circondate rispettivamente dalla prima e dalla seconda regione laterale, formando un foro (210) estendentesi tra la prima superficie e la seconda superficie e delimitato dalla prima e dalla seconda regione laterale; e

- formare la prima e la seconda regione di confinamento all'interno del foro.

27. Metodo secondo la rivendicazione 25, comprendente inoltre le fasi di:

- formare un primo foro (220) all'interno del corpo (2), lungo una prima direzione (z);

- formare un primo strato preliminare (14bis), estendentesi al di sopra del corpo, rivestente le pareti del primo foro e formante la seconda regione laterale (14);

- formare una prima regione preliminare (72bis) al di sopra del primo strato preliminare, una porzione della prima regione preliminare estendendosi all'interno del primo foro e formando la seconda regione di confinamento (11b);

- rimuovere selettivamente una porzione della prima regione preliminare, la porzione rimanente (72) della prima

regione preliminare essendo delimitata da una superficie di processo (S_{p1}), sovrapposta alla seconda regione di confinamento e trasversale rispetto alla prima direzione;

- formare, al di sopra della superficie di processo, un secondo strato preliminare (88bis);

- formare, al di sopra del secondo strato preliminare, una seconda regione preliminare (73);

- rimuovere una porzione della seconda regione preliminare, fino ad esporre detta porzione rimanente della prima regione preliminare, la quale è separata dalla porzione rimanente della seconda regione preliminare da una porzione del secondo strato preliminare;

- formare la prima regione laterale (75) al di sopra di dette porzioni rimanenti della prima e della seconda regione preliminare, ed in modo che definisca un secondo foro (230); e

- formare la prima regione di confinamento (11a), all'interno del secondo foro.

p.i.: STMICROELECTRONICS S.R.L.

Elena CERBARO

CLAIMS

1. An integrated optoelectronic device, delimited by a first surface (S_1) and a second surface (S_2) and comprising:

5 - a body (2) of semiconductor material, formed inside which is at least one optoelectronic component chosen between a detector (30) and an emitter (130); and

- an optical path (OP), which is at least in part of a guided type and extends between the first surface and the second surface, said optical path traversing the body;

10 wherein the optoelectronic component is optically coupled, through the optical path, to a first portion of free space and a second portion of free space, which are arranged, respectively, above and underneath the first and second surfaces.

2. The device according to claim 1, further comprising a top region (4; 75), arranged on top of the body (2) and forming the first surface (S_1), the body being delimited by the second surface (S_2) and by a main surface (S_3), the main surface being arranged between the first and second surfaces; and wherein the optical path (OP) is formed by a first confinement region (11a, 11b) and a second confinement region (132, 134), the first confinement region extending within the top region, starting from the first surface, the second confinement region extending within the body, starting from the second surface; and wherein the first confinement region is surrounded laterally by a first lateral region (12; 75), which has a refractive index (n_2) less than the refractive index (n_1) of the first confinement region so that the first confinement region and the first lateral region form a first coupling waveguide (22); and wherein the second confinement region is surrounded laterally by a second lateral region (14), which has a refractive index (n_2) less than the refractive index (n_1)

of the second confinement region so that the second confinement region and the second lateral region form a second coupling waveguide (24).

5 3. The device according to claim 2, further comprising a first coating layer (12), which surrounds laterally the first confinement region (11a; 132) and forms the first lateral region.

10 4. The device according to claim 2 or claim 3, further comprising a second coating layer (14), which surrounds laterally the second confinement region (11b; 134) and forms the second lateral region.

15 5. The device according to any one of claims 2 to 4, comprising a hole (8), which extends between the first surface (S_1) and the second surface (S_2), the first and second confinement regions (11a; 11b) being arranged within the hole.

20 6. The device according to claim 5, comprising a core (10), which is arranged within the hole (8) and forms the first and second confinement regions (11a, 11b).

7. The device according to claim 6, wherein the first and
25 second confinement regions (11a, 11b) are arranged on top of one another; and wherein the first and second lateral regions (12, 14) are arranged on top of one another and are separate from one another so that the core comprises a non-coated region (11c), arranged between the first and second
30 confinement regions; and wherein the optoelectronic component (30; 130) is optically coupled to said non-coated region.

8. The device according to claim 7, wherein the optoelectronic component (30; 130) is formed by a first region (32) and a

second region (34) of semiconductor material, which have different types of conductivity and are separated by an interface surface (I), which is in direct contact with the non-coated region (11c) of the core (10).

5

9. The device according to any one of claims 2 to 4, wherein the first and second confinement regions (11a, 11b) are arranged on top of one another; and wherein the electronic component is arranged between the first and second confinement regions (11a, 11b).

10. The device according to claim 6, further comprising a first transverse channel (72; 80; 140), which extends transverse to the core (10), with which it is in direct contact, and is surrounded at the top and at the bottom by a third lateral region (2,4; 75), which has a refractive index (n_2) less than the refractive index (n_1) of the first transverse channel so that the first transverse channel and the third lateral region form a first transverse waveguide (83), said first transverse waveguide being optically coupled to the first and second coupling waveguides (22, 24).

11. The device according to claim 10, further comprising an optical beam splitter (90) designed to couple the first transverse waveguide (83) optically to the first and second coupling waveguides (22, 24).

12. The device according to claim 11, wherein the first and second coupling waveguides (22, 24) extend parallel to a first direction (z), and wherein the first transverse waveguide (83) extends parallel to a second direction (x); and wherein the optical beam splitter (90) comprises a first layered element (92), which is arranged within the hole (8), transverse to the first and second directions, and has a refractive index (n_2)

less than the refractive index of the core (n_1).

13. The device according to claim 12, further comprising a second transverse channel (74), which extends transverse to the core (10) and is surrounded at the top and at the bottom by a fourth lateral region (2,4; 75), the refractive index (n_2) of the second transverse channel being greater than the refractive index (n_1) of the fourth lateral region so that the second transverse channel and the fourth lateral region form a second transverse waveguide (85).

14. The device according to claim 13, wherein the first layered element (92) separates the first confinement region (11a) from the second confinement region (11b), and the first transverse channel (72) from the second transverse channel (74), said first layered element being moreover designed so as to couple an optical signal alternatively to the first transverse waveguide, if the optical signal propagates in the first coupling waveguide (22) starting from the first surface (S_1), or else to the second transverse waveguide, if the optical signal propagates in the second coupling waveguide (24) starting from the second surface (S_2).

15. The device according to claim 13, wherein the second transverse waveguide (85) extends parallel to the second direction (x), and wherein the optical beam splitter (90) comprises a second layered element (94), arranged specular to the first element (92), with respect to an axis parallel to the first direction (z).

16. The device according to claim 15, wherein the optical beam splitter (90) further comprises a third layered element (98) and a fourth layered element (100), which are arranged, respectively, specular to the first and second layered

elements (92, 94), with respect to an axis parallel to the second direction (x), the optical beam splitter (90) being designed to couple an optical signal both to the first and to the second transverse waveguides (83, 85), if the optical
5 signal propagates in the first coupling waveguide (22) starting from the first surface (S_1) or else propagates in the second coupling waveguide (24) starting from the second surface (S_2).

10 17. The device according to any one of claims 12 to 16, wherein the first and second directions (z, x) are orthogonal to one another and said first layered element (92) forms an angle substantially equal to 45° both with respect to the first direction and with respect to the second direction.

15 18. The device according to claim 10, further comprising a coupling structure (142) designed to couple an optical signal that propagates along the first transverse waveguide (83) and in the direction of the core (10) with the first and second
20 coupling waveguides (22, 24), said coupling structure comprising at least one reflecting surface (S_m).

19. The device according to any one of claims 10-18, wherein the first transverse channel (72; 80; 140) extends on top of
25 the main surface (S_3) of the body (2) and underneath said first surface (S_1).

20. The device according to claim 19, wherein the body (2) forms a recess (112), which extends from the main surface (S_3)
30 and is delimited at least by a first wall (S_{p1}), arranged transverse to the main surface; and wherein the first transverse channel (72) extends at least in part within the recess; and wherein the optoelectronic component (30; 130) is formed by a first region (32) and a second region (34) that

form a junction, said junction facing the first wall.

21. The device according to claim 20, wherein the recess (112) is moreover delimited by a second wall (S_{i2}), which is transverse with respect to the main surface (S_3) and to the first wall (S_{i1}), said junction (32, 34) moreover facing the second wall.

22. The device according to claim 20 or claim 21, wherein a portion of the first transverse channel (72) arranged on top of the first wall (S_{i1}) is delimited at the top by a further wall (S_{i3}), which is parallel to the first wall.

23. An optoelectronic system comprising at least a first optoelectronic device (1, 150) according to any one of the preceding claims, said first optoelectronic device comprising an optical emitter (162); said optoelectronic system further comprising a second optoelectronic device (150), which comprises an optical detector (168), said optical emitter and said optical detector being optically coupled through the optical path (OP) of the first optoelectronic device.

24. A process for manufacturing an optoelectronic device delimited by a first surface (S_1) and by a second surface (S_2), comprising the steps of:

- forming a body (2) of semiconductor material, formed inside which is at least one optoelectronic component chosen between a detector (30) and an emitter (130); and

- forming an optical path (OP), which is at least in part of a guided type and extends between the first surface and the second surface, said optical path traversing the body;

and wherein said step of forming an optical path comprises forming the optical path so that the optoelectronic component is optically coupled, through said optical path, to a first

portion of free space and a second portion of free space, which are arranged, respectively, above and underneath the first and second surfaces.

5 25. The manufacturing process according to claim 24, wherein the body (2) is delimited by the second surface (S_2) and by a main surface (S_3), and further comprising the step of forming on top of the body (2) a top region (4; 75) forming the first surface (S_1) so that the main surface is arranged between the
10 first and second surfaces; and wherein the step of forming the optical path (OP) comprises:

- forming, starting from the first surface (S_1), a first confinement region (11a; 132), which extends into the top region;
- 15 - forming, starting from the second surface (S_2), a second confinement region (11b; 134), which extends into the body;
- forming, around the first confinement region, a first lateral region (12; 75), which has a refractive index (n_2) less than the refractive index (n_1) of the first confinement
20 region; and
- forming, around the second confinement region, a second lateral region (14), which has a refractive index (n_2) less than the refractive index (n_1) of the second confinement region.

25

26. The process according to claim 25, wherein said steps of forming a first confinement region and a second confinement region (11a; 132; 11b, 134) and a first lateral region and a second lateral region (12, 14; 75) comprise:

- 30
- forming a first trench (202) within the top region;
 - forming the first lateral region within the first trench;
 - forming a second trench (206) within the body (2);
 - forming the second lateral region within the second trench;
 - selectively removing portions of the top region and of the

body surrounded, respectively, by the first lateral region and by the second lateral region, thereby forming a hole (210), which extends between the first surface and the second surface and is delimited by the first and second lateral regions; and

- 5 - forming the first and second confinement regions within the hole.

27. The process according to claim 25, further comprising the steps of:

- 10 - forming a first hole (220) within the body (2) in a first direction (z);
- forming a first preliminary layer (14bis), which extends on top of the body, coats the walls of the first hole, and forms the second lateral region (14);
15 - forming a first preliminary region (72bis) on top of the first preliminary layer, a portion of the first preliminary region extending within the first hole and forming the second confinement region (11b);
- selectively removing a portion of the first preliminary region, the remaining portion (72) of the first preliminary region being delimited by a process surface (S_{P1}), arranged on top of the second confinement region and transverse with respect to the first direction;
20 - forming, on top of the process surface, a second preliminary layer (88bis);
25 - forming, on top of the second preliminary layer, a second preliminary region (73);
- removing a portion of the second preliminary region until said remaining portion of the first preliminary region is exposed, which is separated from the remaining portion of the second preliminary region by a portion of the second preliminary layer;
30 - forming the first lateral region (75) on top of said remaining portions of the first and second preliminary regions

and so that it will form a second hole (230); and
- forming the first confinement region (11a) within the second
hole.

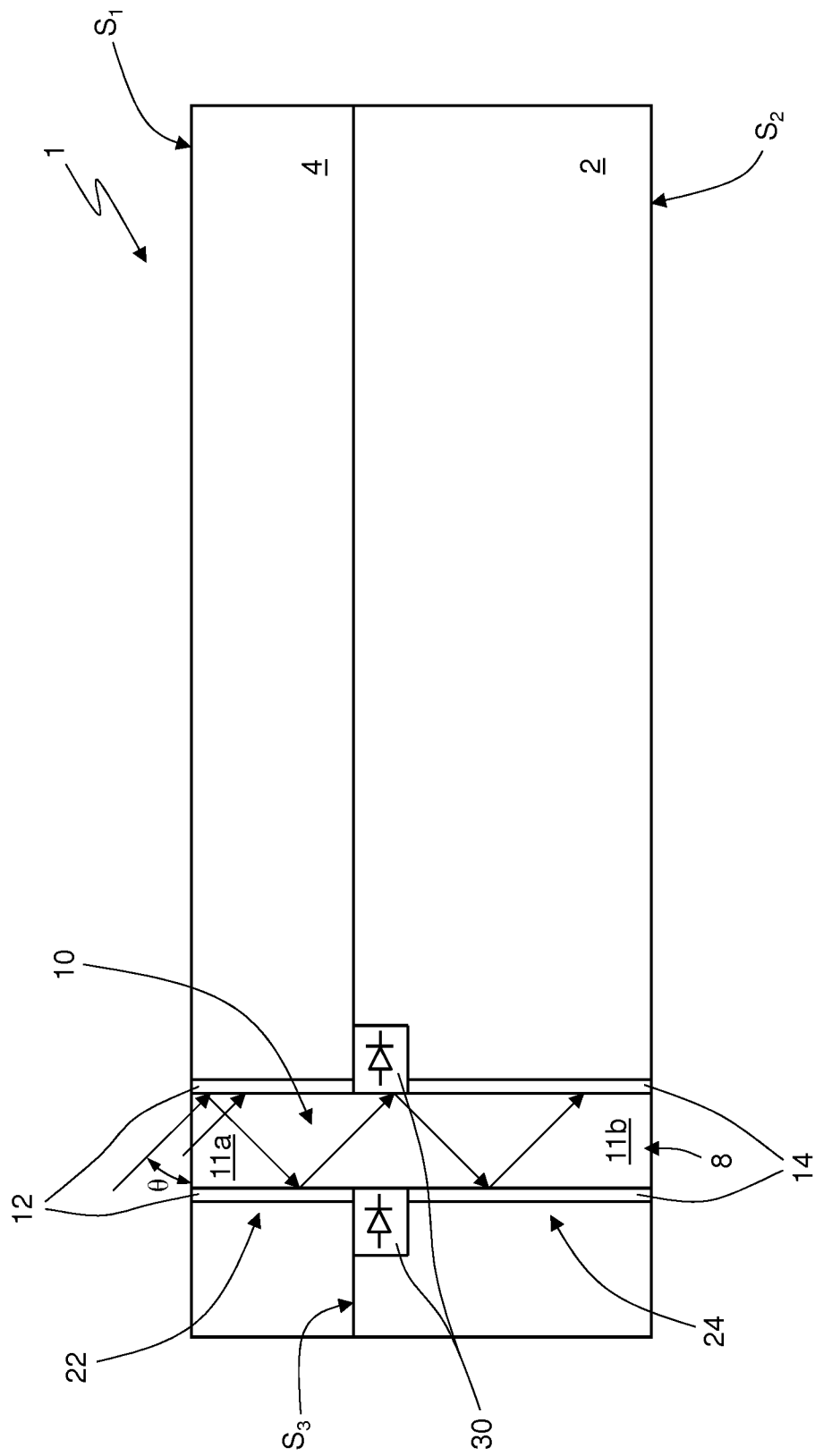


Fig. 1

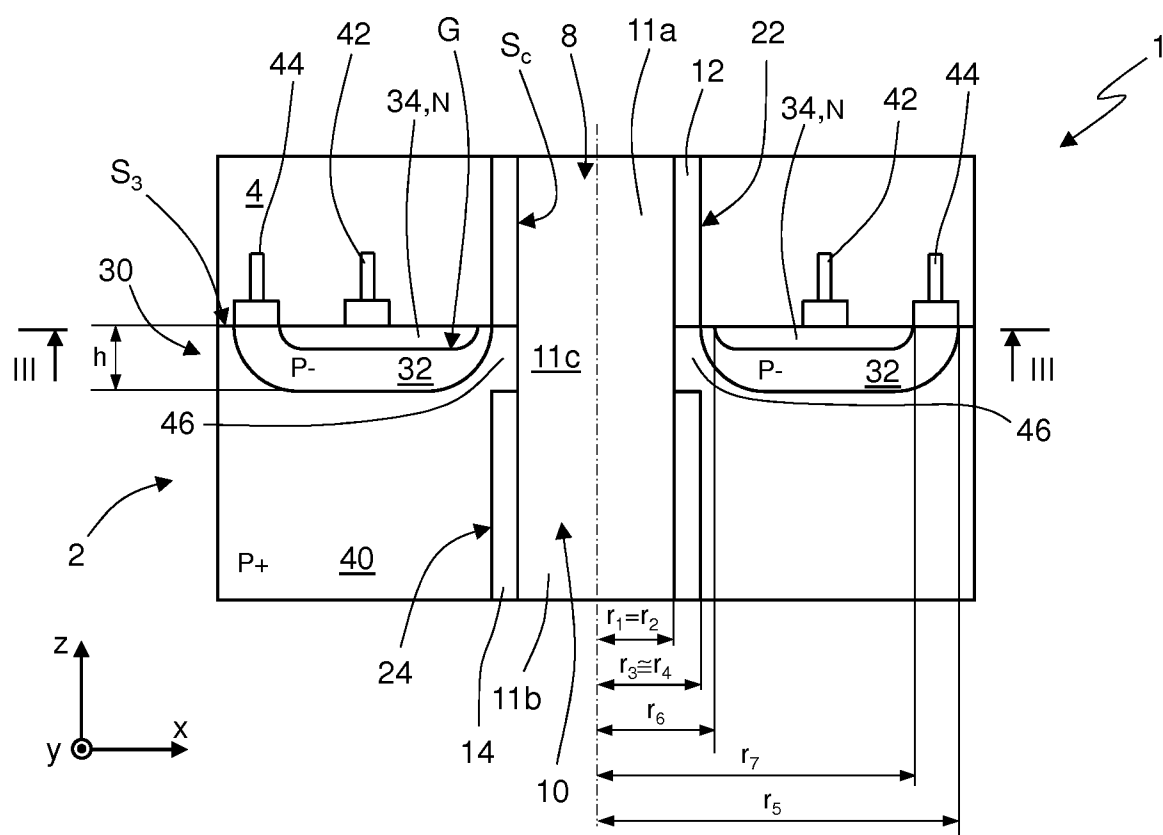


Fig.2

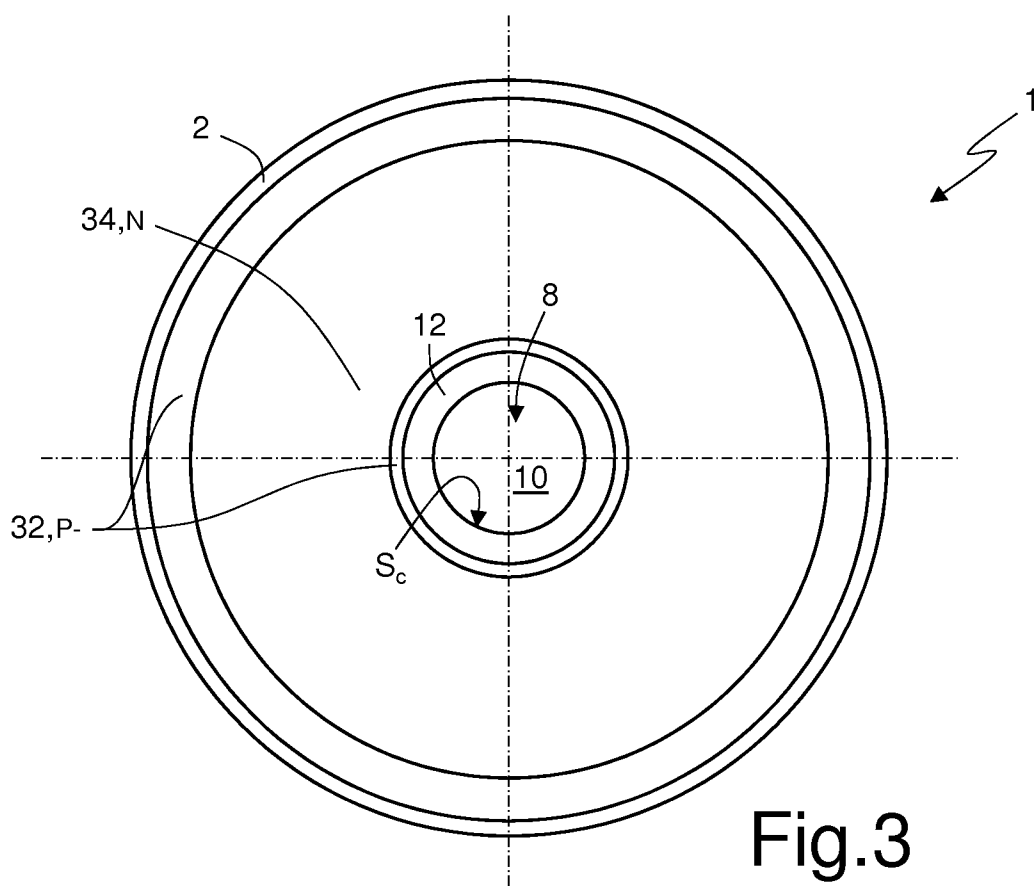


Fig.3

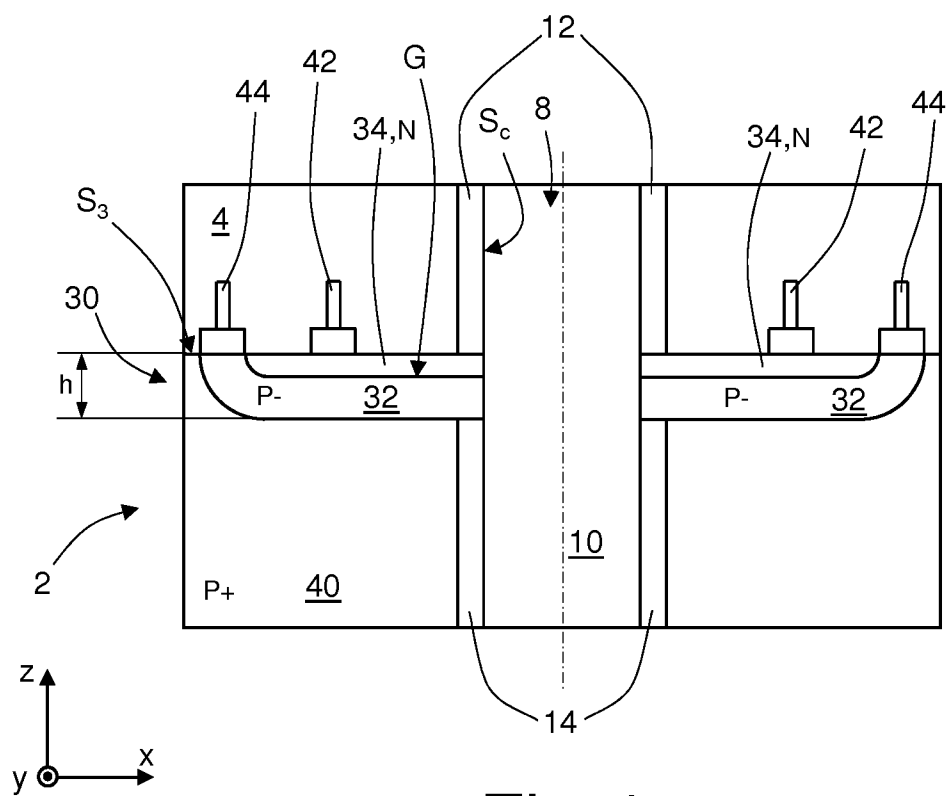


Fig.4

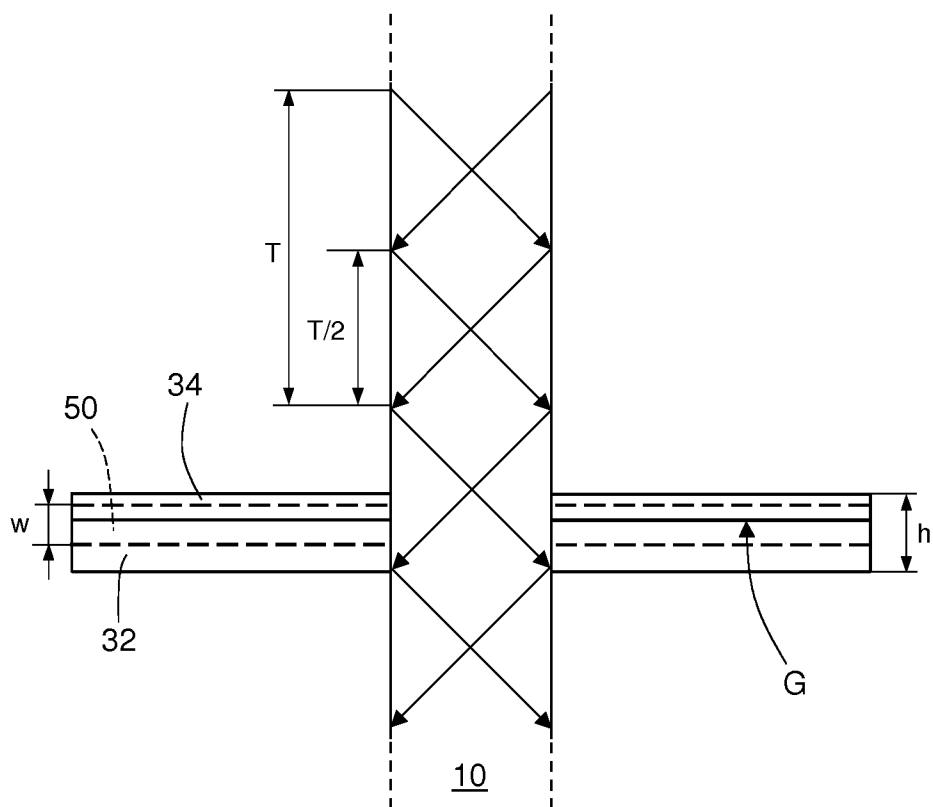


Fig.5

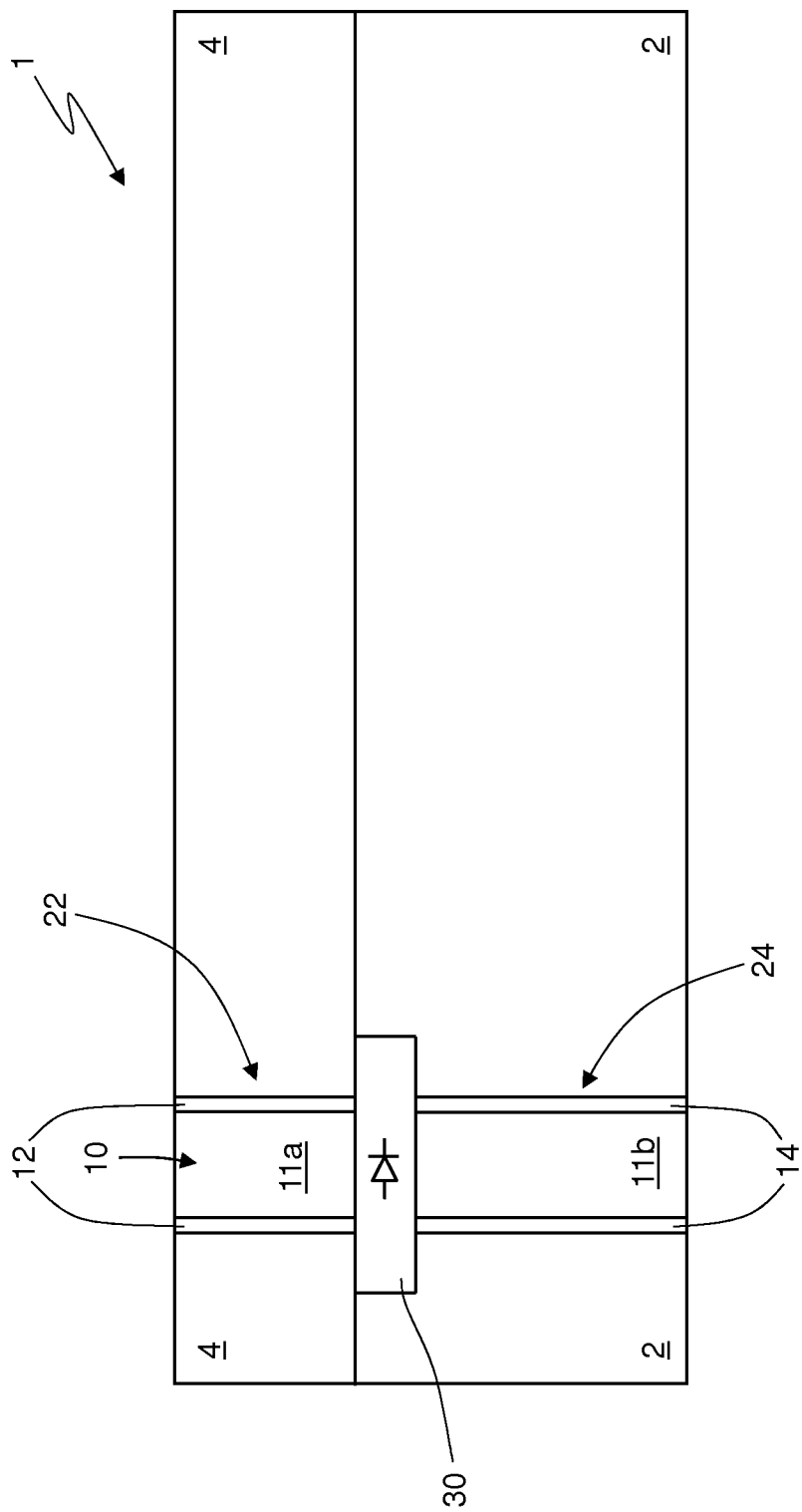


Fig.6

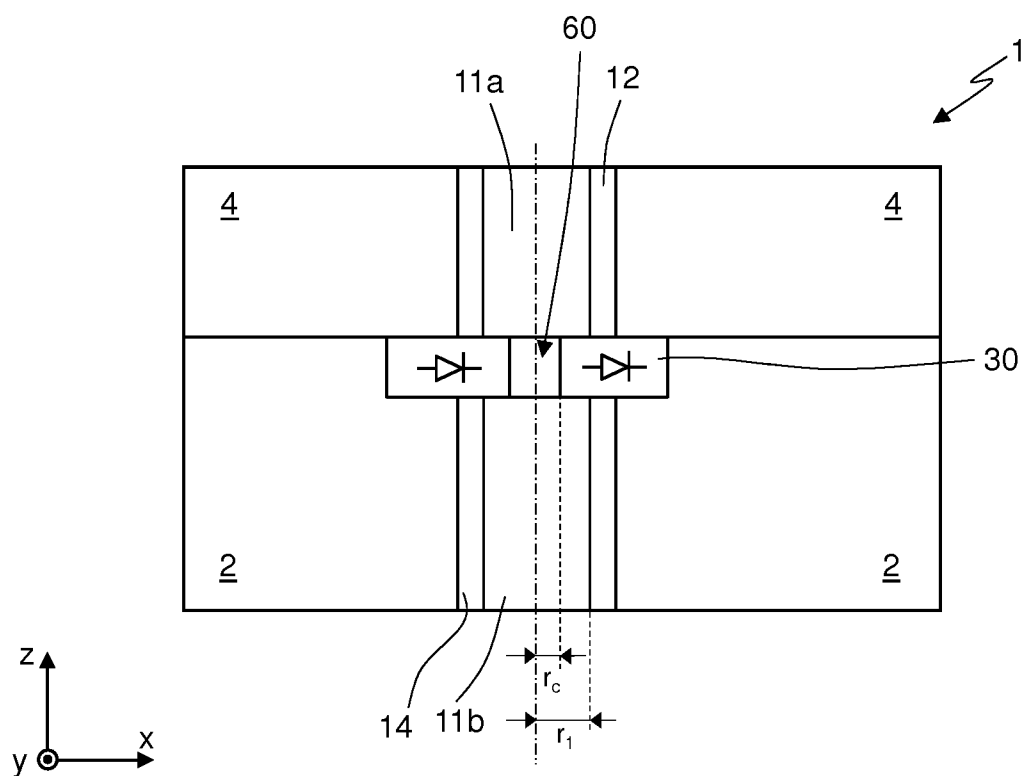


Fig.7

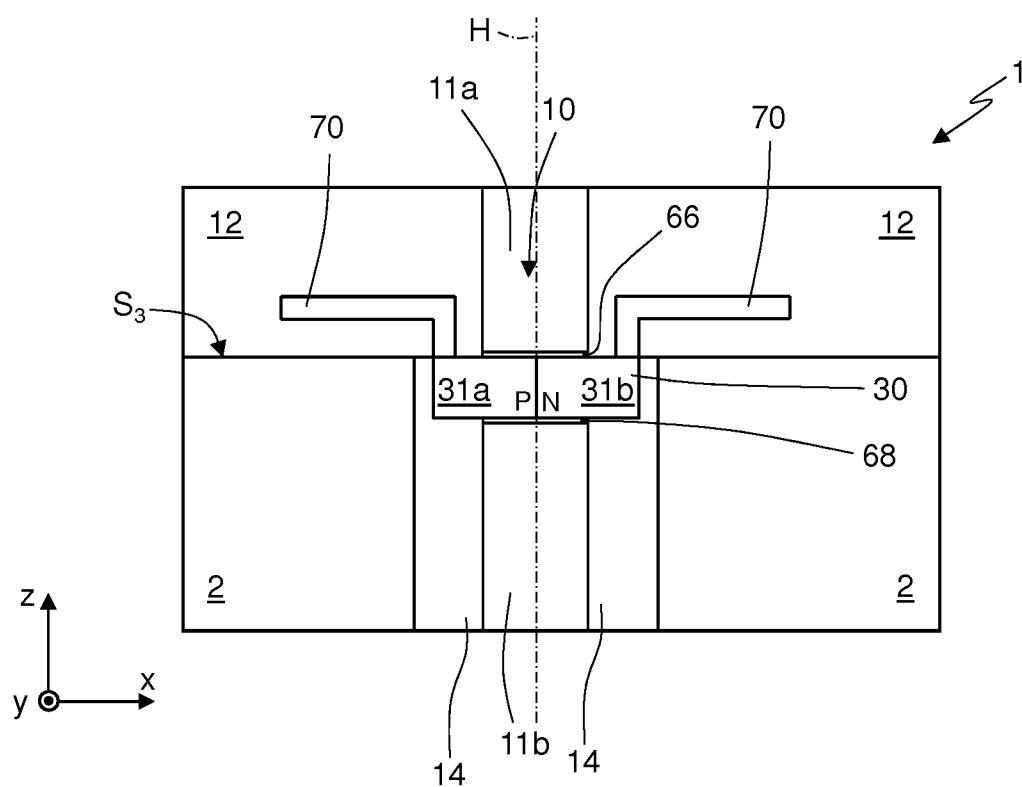


Fig.9

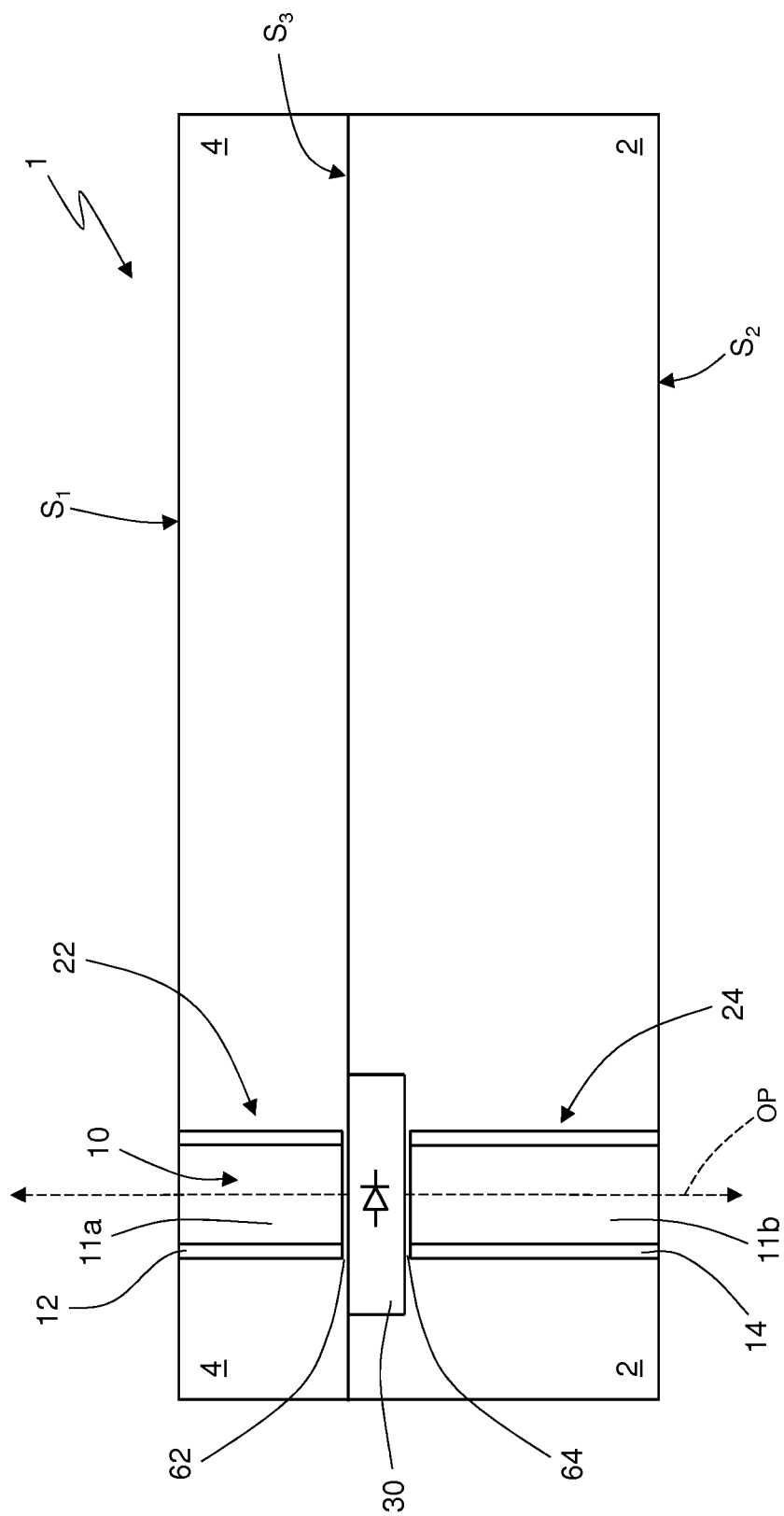
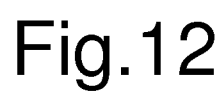
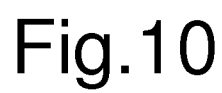


Fig.8



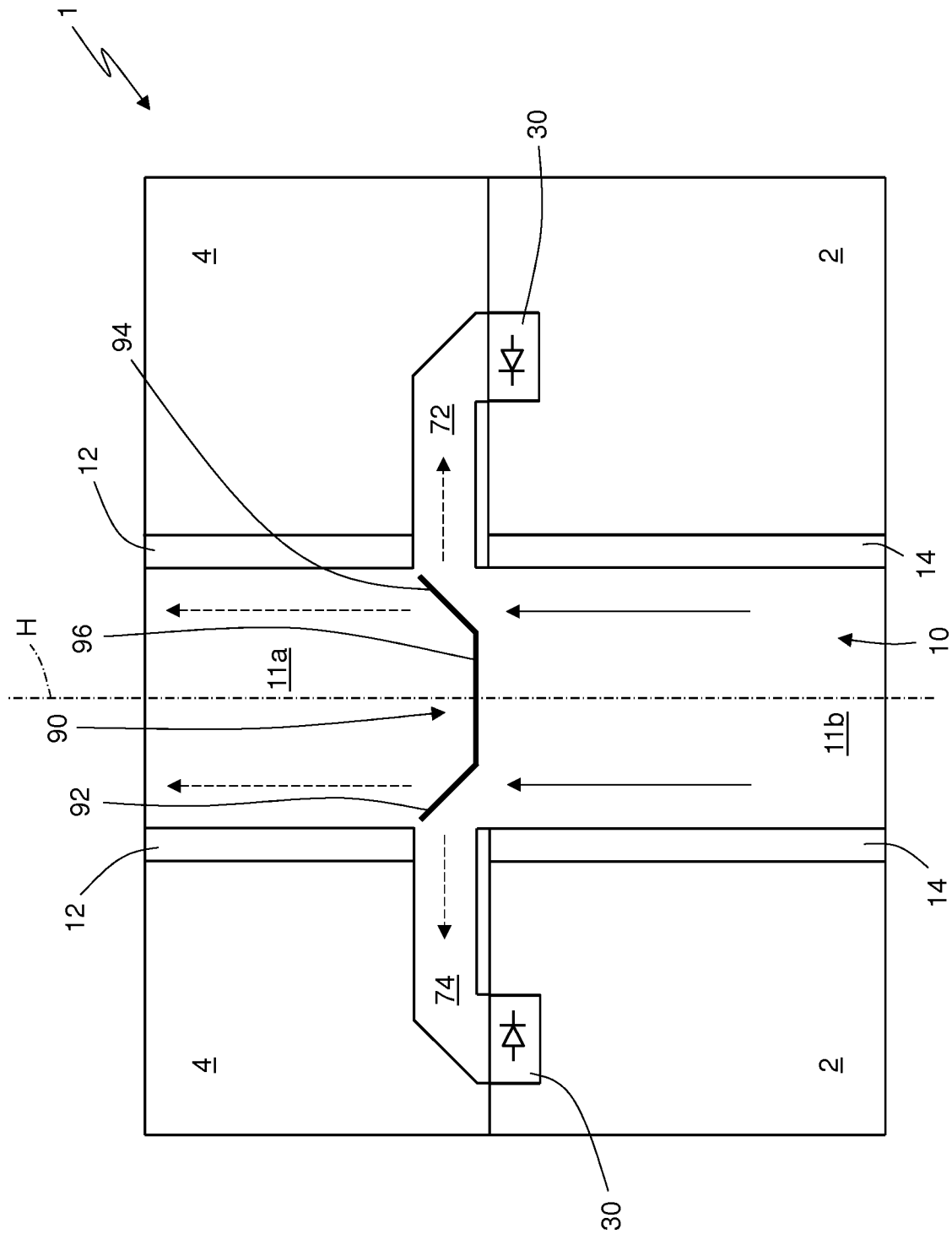


Fig.14

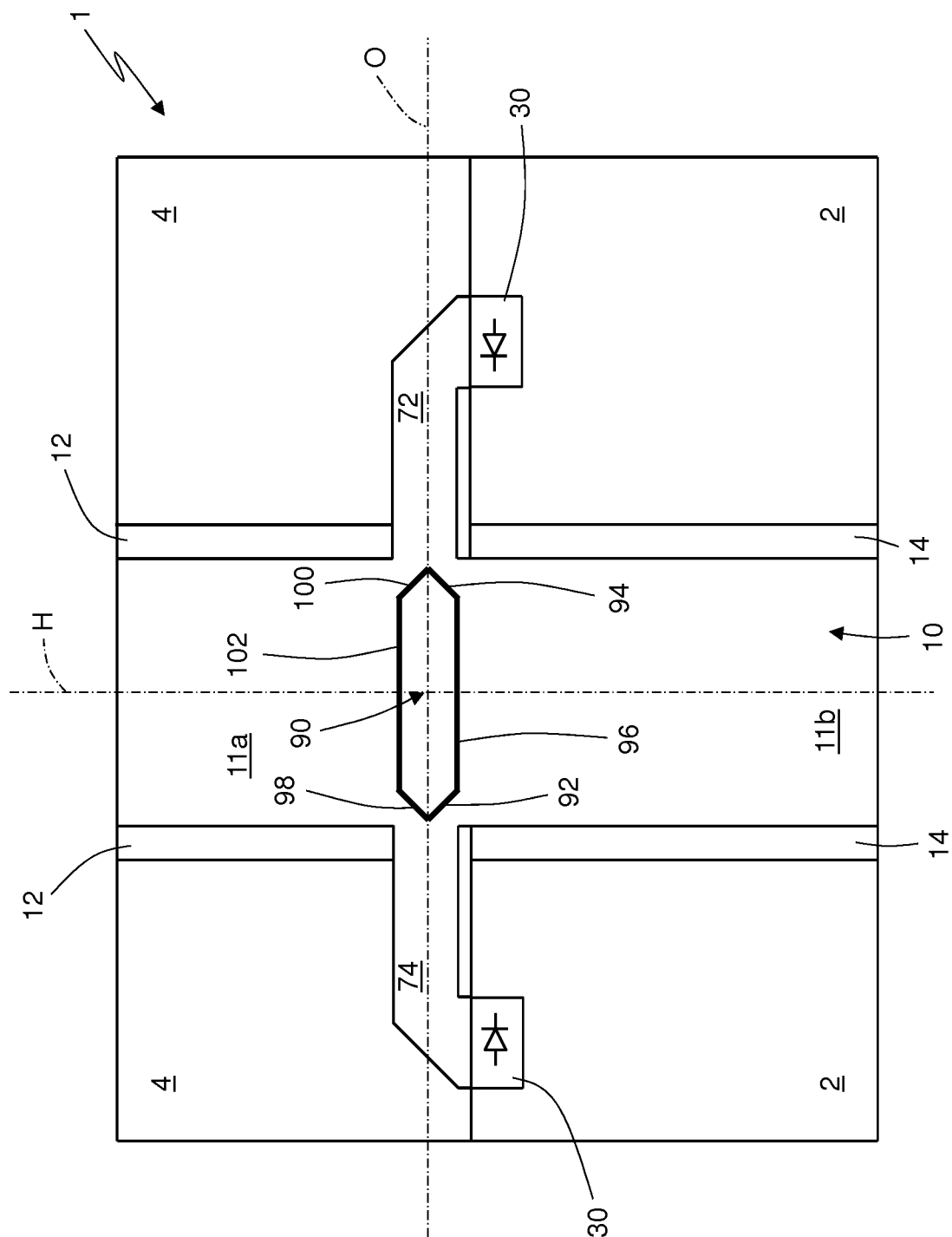


Fig.15

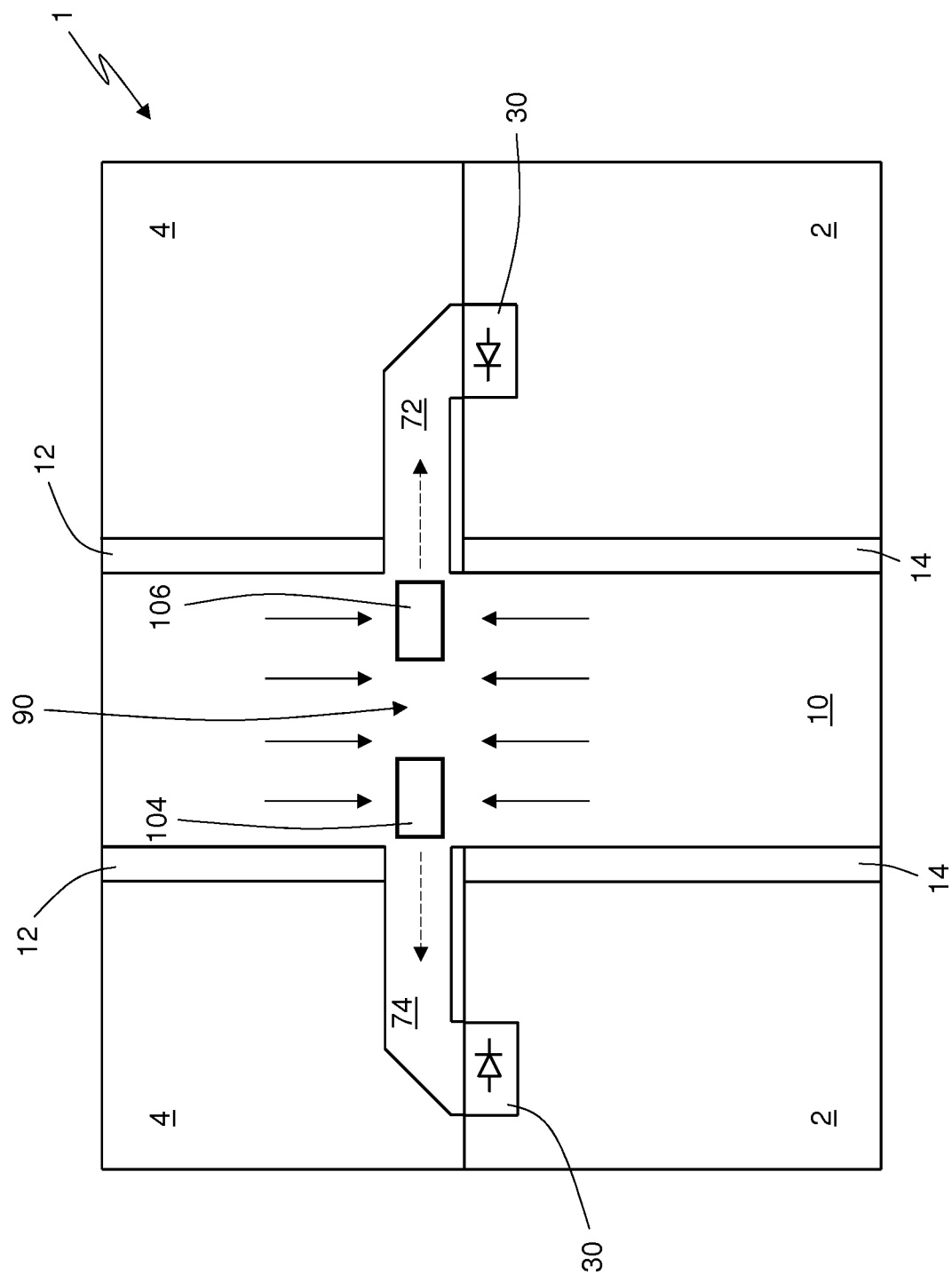


Fig.16

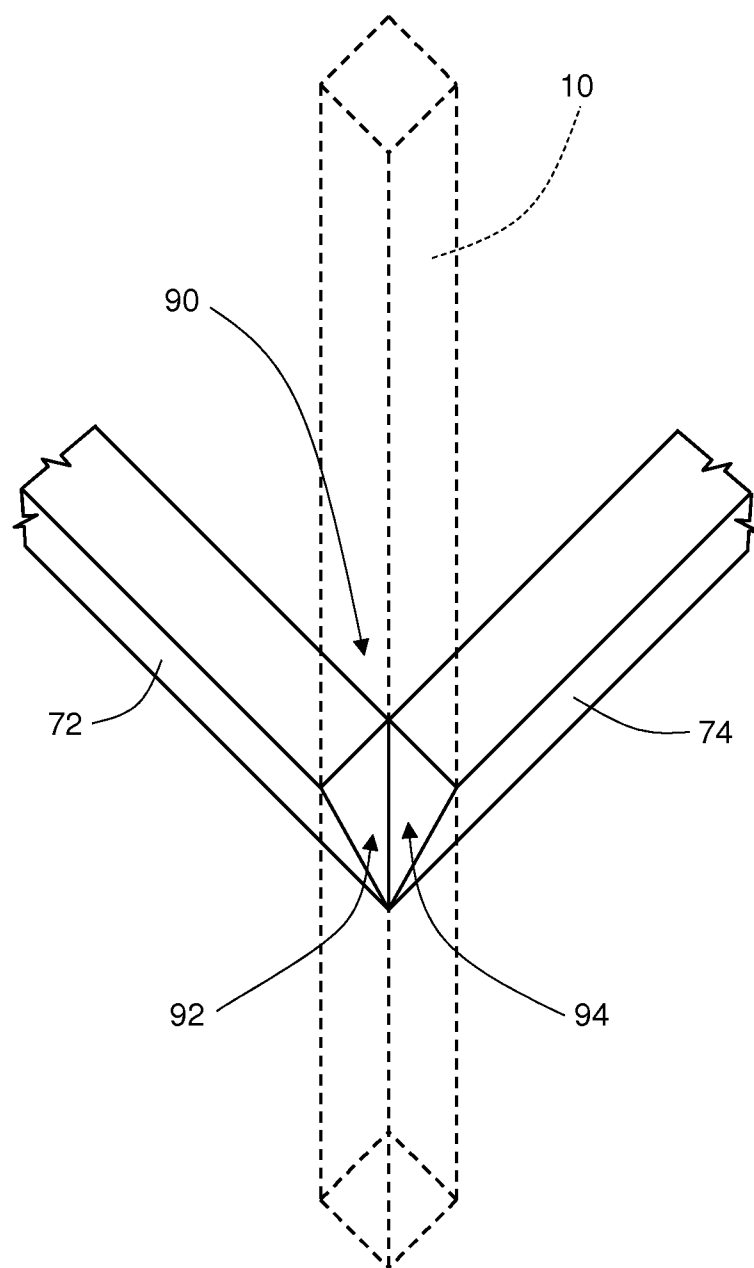
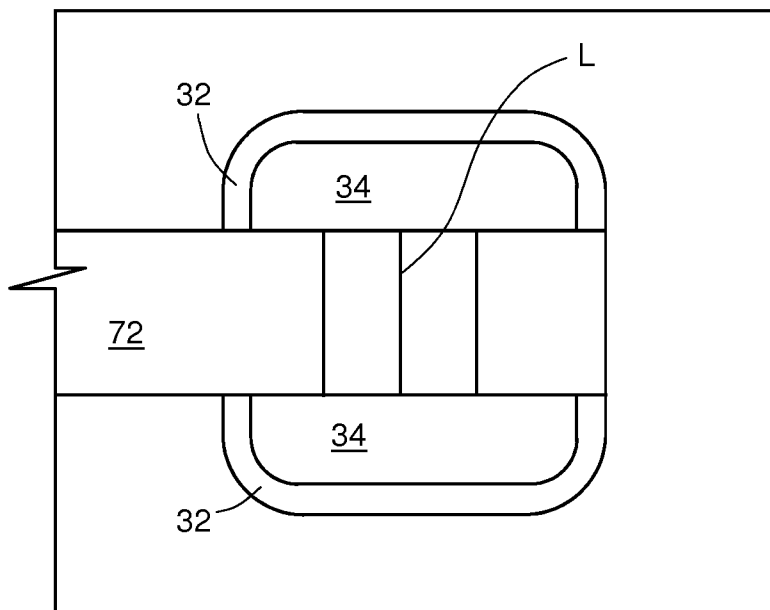
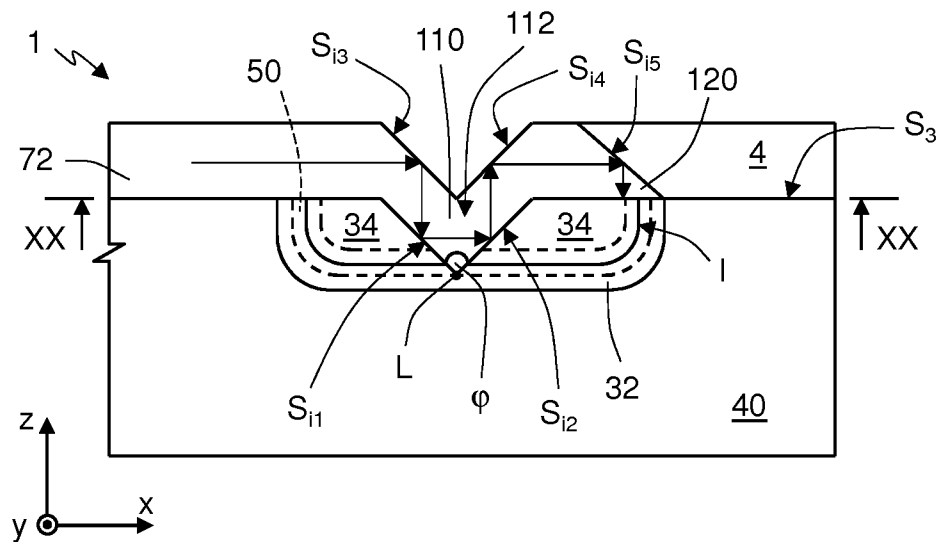
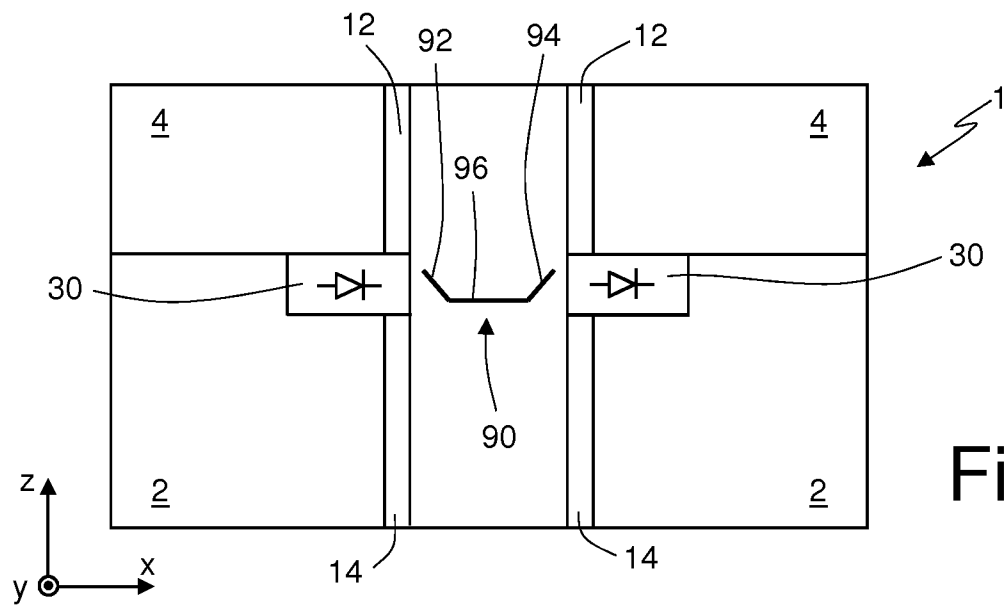


Fig.17



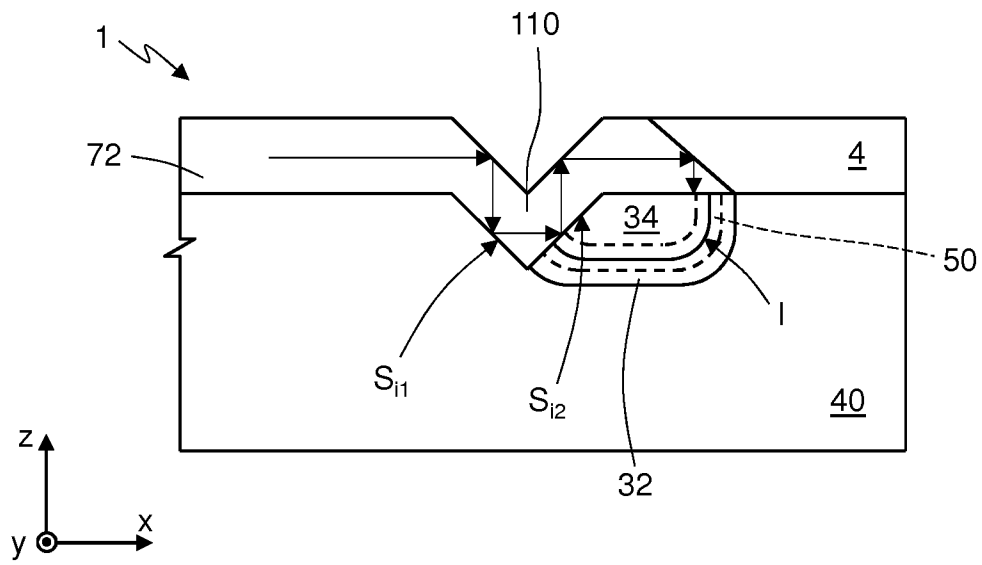


Fig.19b

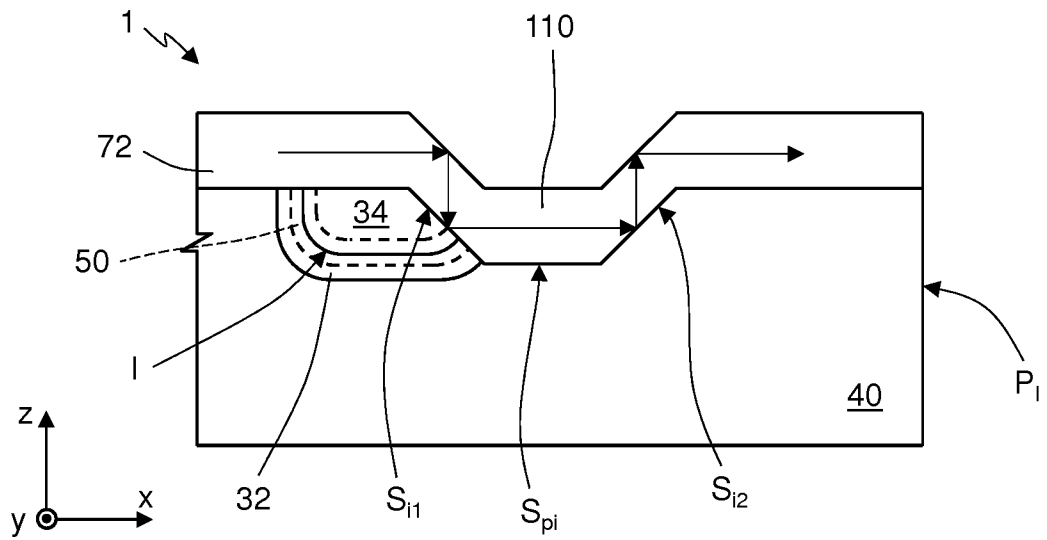


Fig.19c



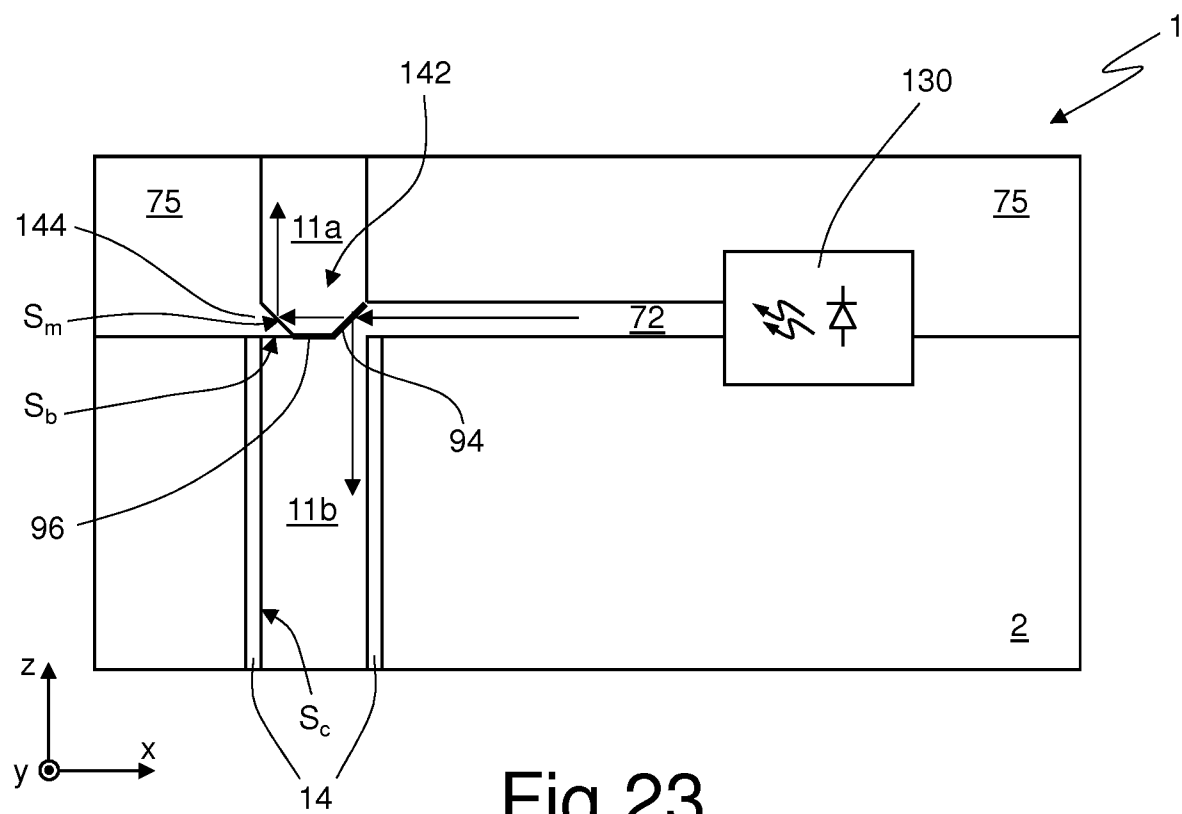


Fig.23

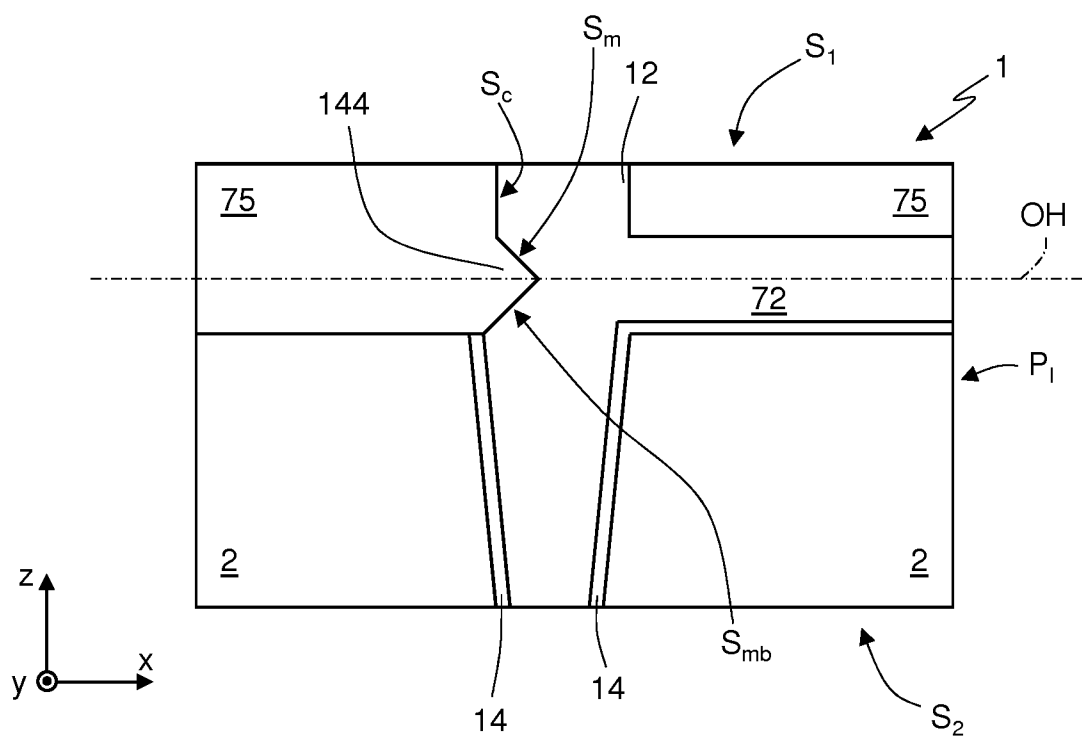


Fig.24

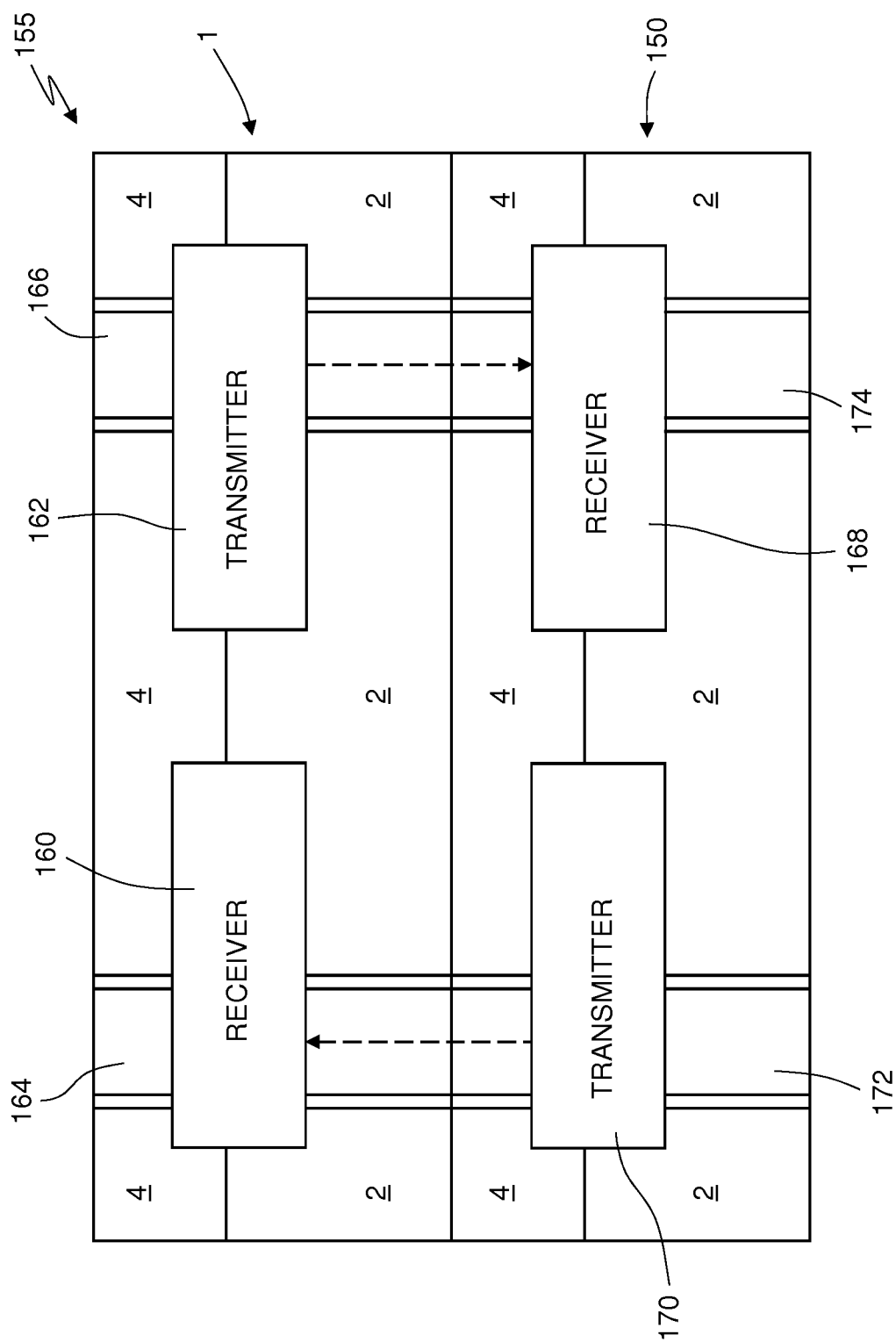


Fig.25

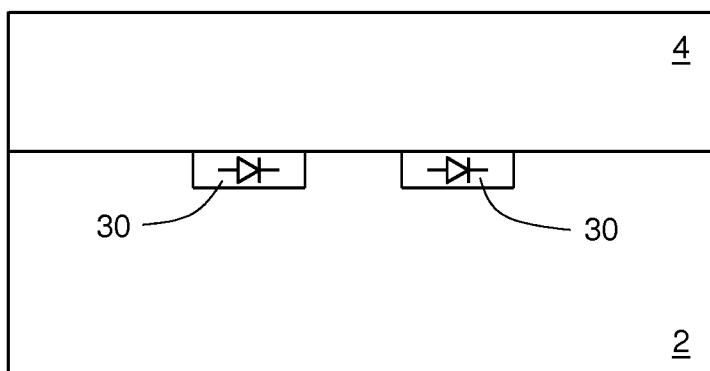


Fig.26a

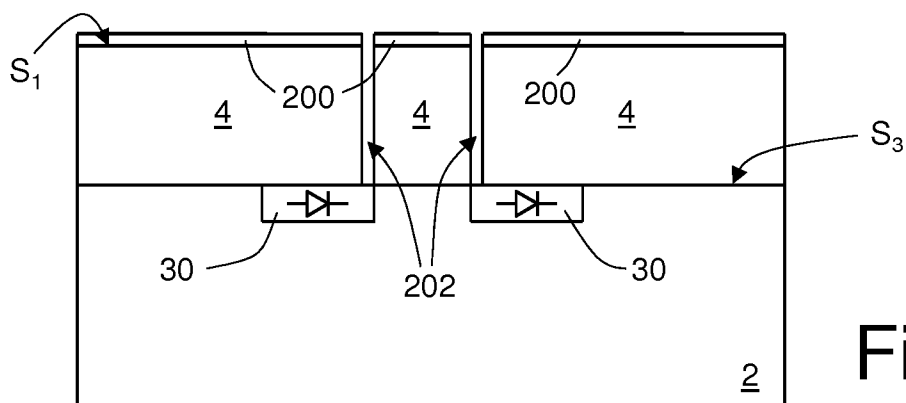


Fig.26b

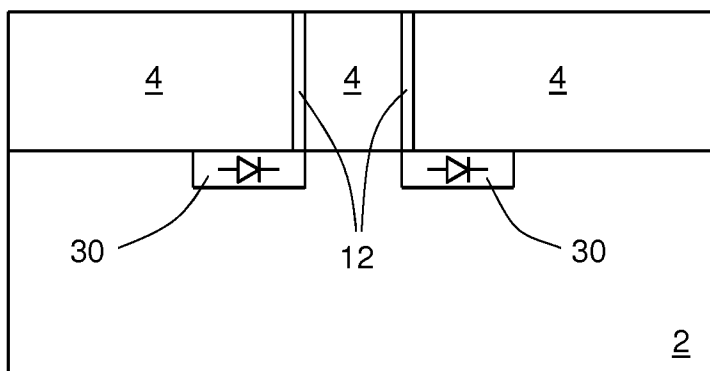


Fig.26c

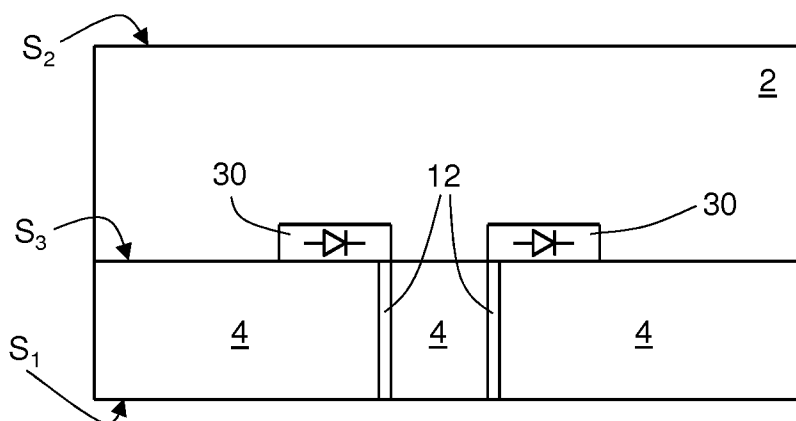


Fig.26d

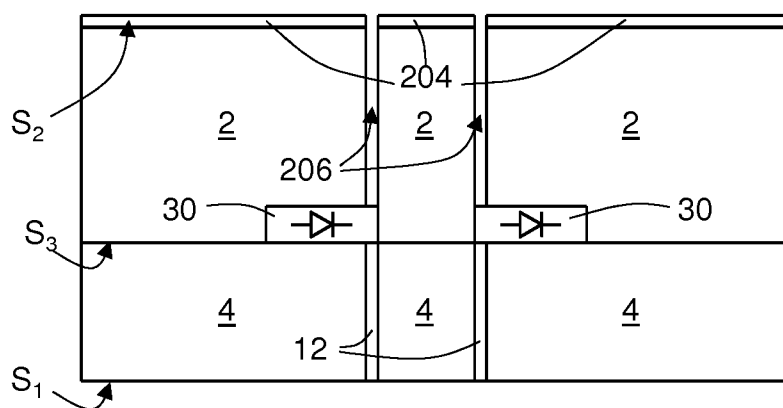


Fig.26e

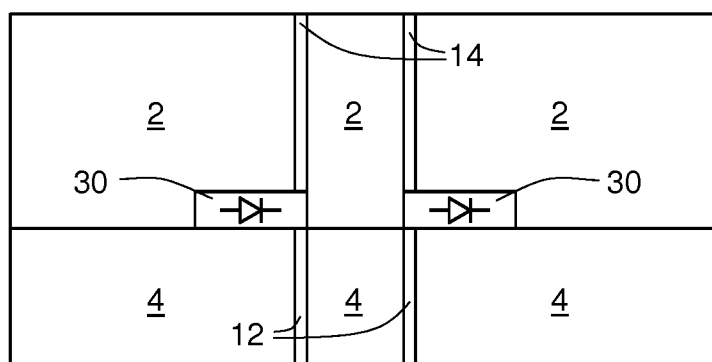


Fig.26f

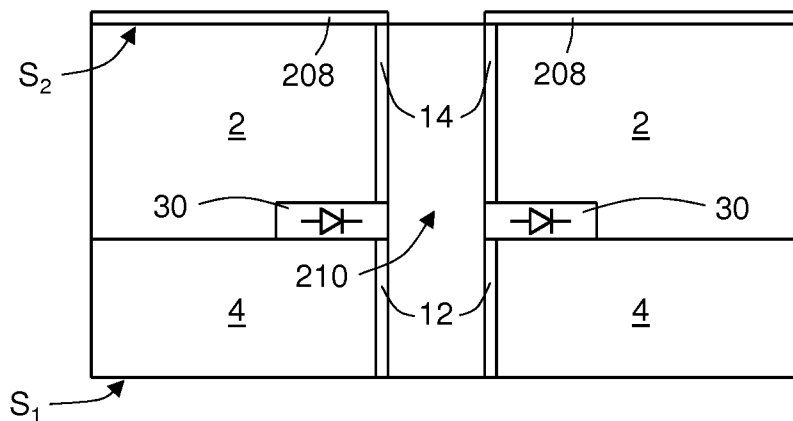


Fig.26g

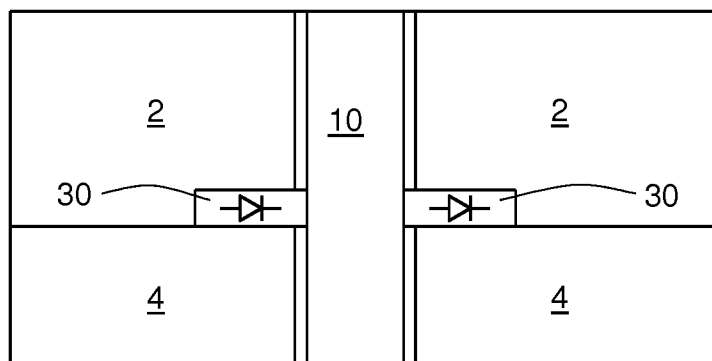


Fig.26h

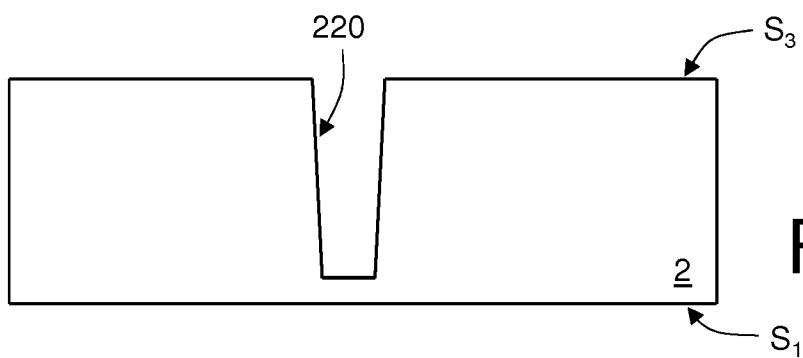


Fig.27a

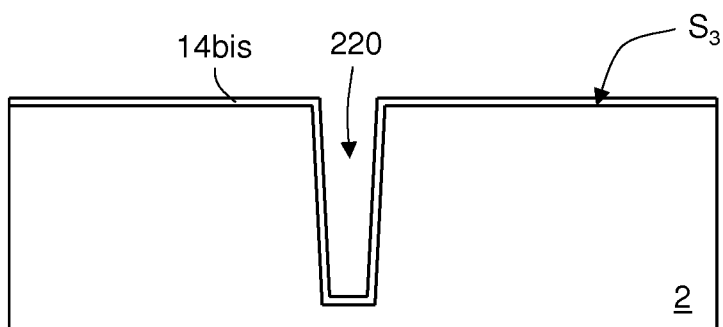


Fig.27b

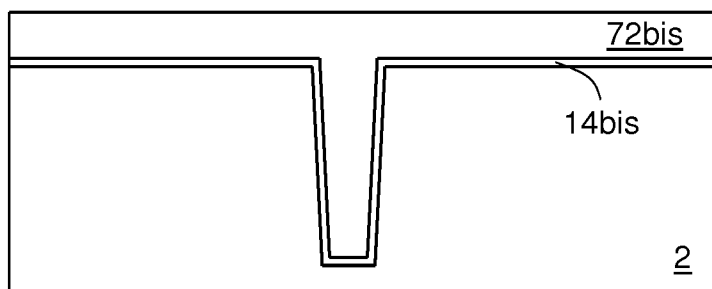


Fig.27c

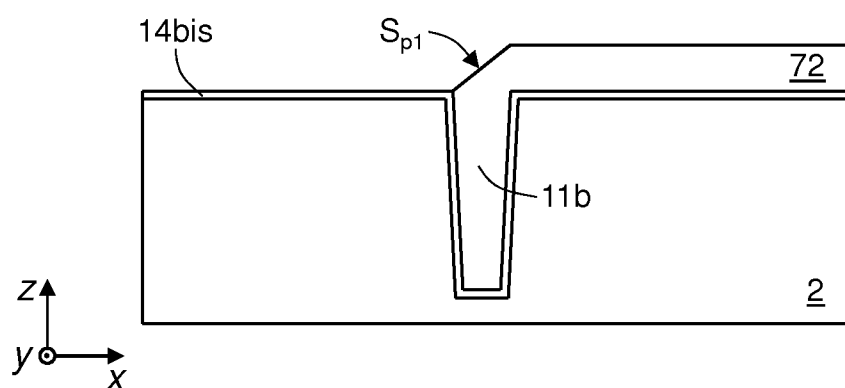


Fig.27d

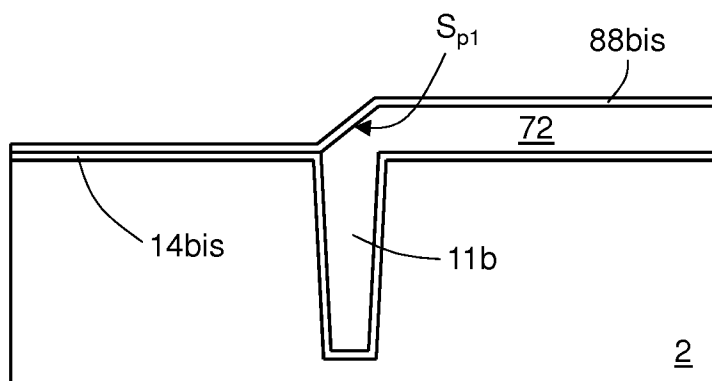


Fig.27e

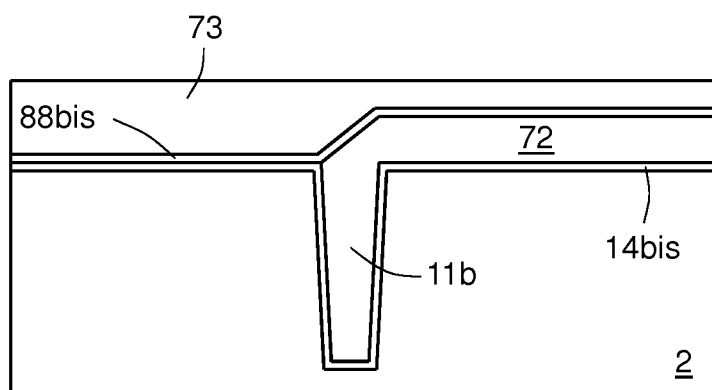


Fig.27f

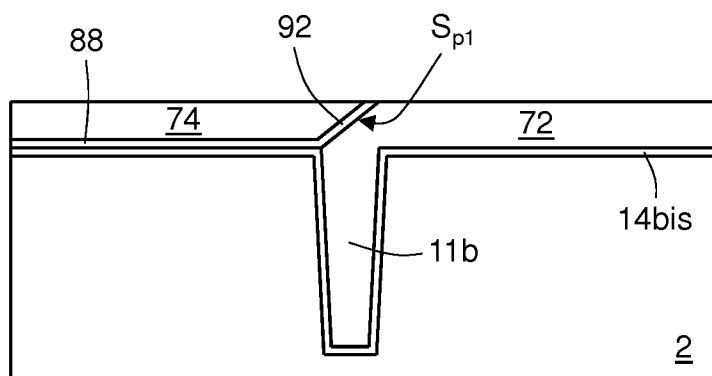


Fig.27g

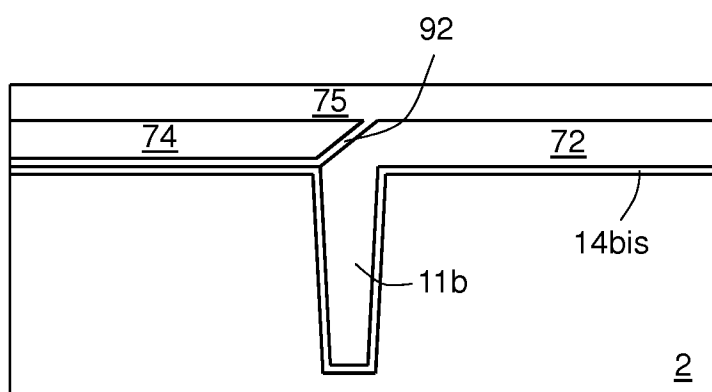


Fig.27h

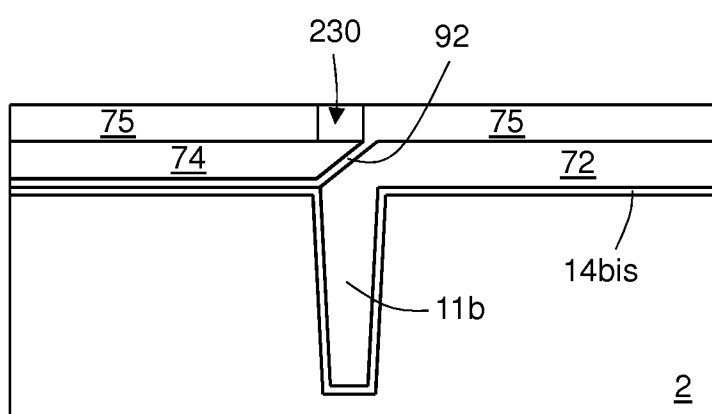


Fig.27i

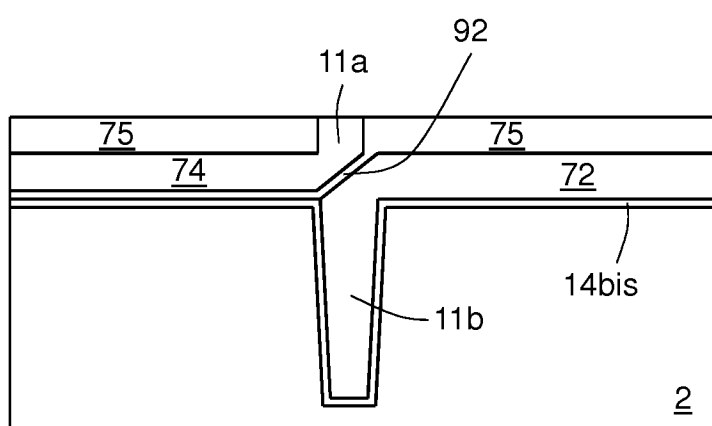


Fig.27l

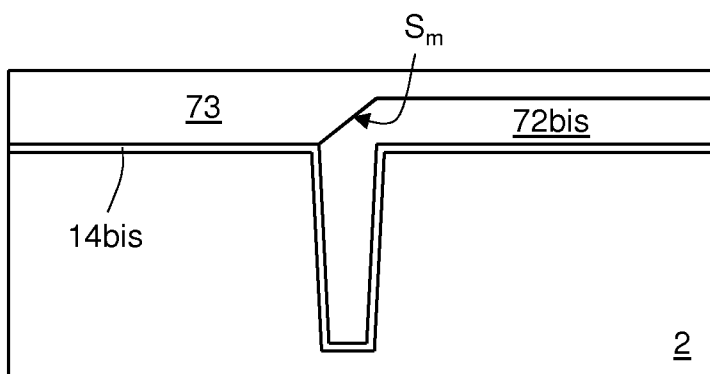


Fig.28a

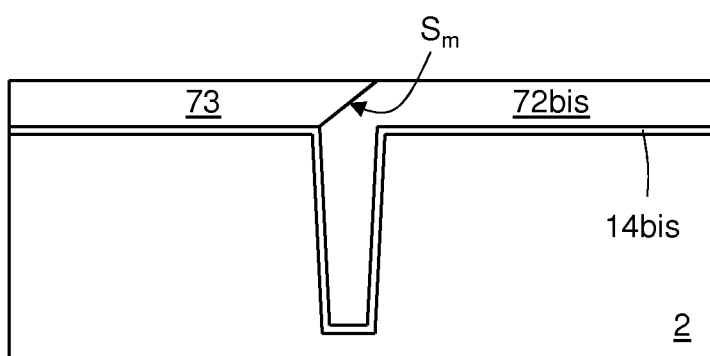


Fig.28b

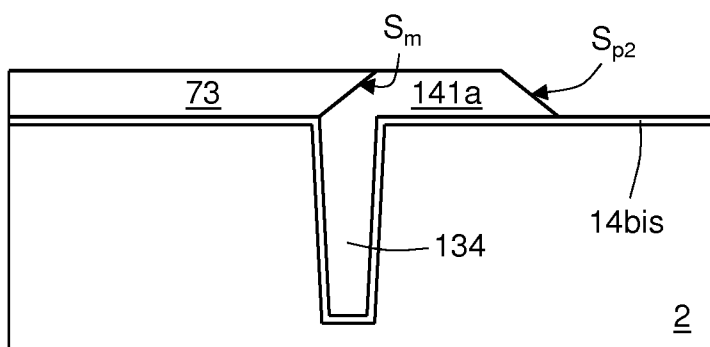


Fig.28c

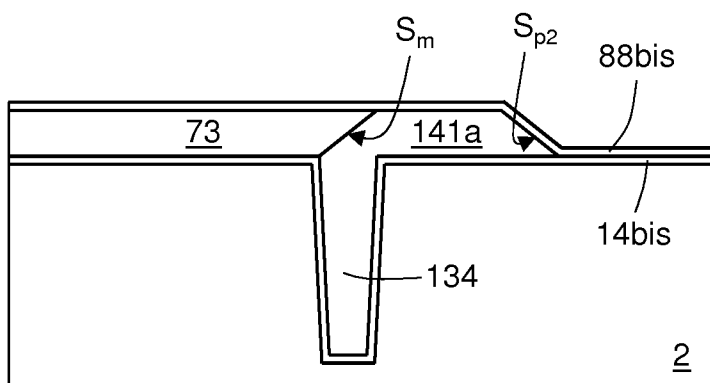


Fig.28d

